

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170358

择伐后落叶松云冷杉林直径结构及生长的动态变化

朱子卉¹ 杨 华¹ 张 恒² 王全军³ 孙 权³ 杨 超⁴

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京十三陵林场, 北京 102200;
3. 吉林省延吉市汪清林业局, 吉林 延吉 133200; 4. 辽宁省林业调查规划院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:【目的】混交林择伐技术对实现林分可持续经营至关重要。本文对择伐后的落叶松云冷杉林林分直径结构和生长动态变化进行研究,为科学进行择伐活动和合理调整林木径级株数结构提供参考。【方法】以落叶松云冷杉近天然混交林为研究对象,设置对照样地(0%)和轻度(20%)、中度(30%)、强度(40%)择伐样地各4块,利用伐后5~11年的观测结果,比较分析了不同强度择伐对落叶松云冷杉混交林林分结构及生长的影响。【结果】研究发现中度、强度择伐后落叶松云冷杉混交林断面积和蓄积生长率明显增大,表明择伐为林分中保留木创造养分空间,加速了林分胸径和蓄积的生长进程。伐后5~11年,对照样地和中度择伐样地 Weibull 分布曲线呈右偏,样地内中小径材居多,且中度择伐样地径级分布宽广;轻度择伐和强度择伐样地呈左偏分布,林分内中大径材较多。对照样地 Weibull 分布的 c 值变化不大,择伐样地 c 值随时间增加而增大,说明择伐去除劣势木,增加林分空间,林分结构得到优化。一定强度的择伐还能降低林分中林木的枯损率,而高强度择伐会增加林木风倒的风险。【结论】从可持续经营角度看,可根据不同经营目的选择适当的择伐策略。中度择伐后落叶松云冷杉林的林木生长速率明显增大,林分中林木径级较完整,林分结构稳定,林木枯损率减少,有利于林分生长的可持续发展。

关键词:择伐;落叶松云冷杉混交林;直径结构;林分生长;动态变化

中图分类号:S753.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2018)05-0055-08

引文格式:朱子卉,杨华,张恒,等. 择伐后落叶松云冷杉林直径结构及生长的动态变化[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 55-62. Zhu Zihui, Yang Hua, Zhang Heng, et al. Dynamic change of larch-spruce-fir mixed stand growth and structure after selective thinning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5): 55-62.

Dynamic change of larch-spruce-fir mixed stand growth and structure after selective thinning

Zhu Zihui¹ Yang Hua¹ Zhang Heng² Wang Quanjun³ Sun Quan³ Yang Chao⁴

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Ming Tombs Forest Farm, Beijing 102200, China;
3. Wangqing Forestry Bureau, Yanji 133200, Jilin, China;
4. Liaoning Forestry Investigation and Planning Institute, Shenyang 110000, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] Thinning program is crucial to the management of mixed forests. The diameter structure and growth changes of larch-spruce-fir stand after selective thinning were studied in order to help creating better thinning programs and improve stand quality. [Method] Larch-spruce-fir mixed forests including 12 selective thinning plots with different thinning intensities (light, 20%; medium, 30%; heavy, 40%) and 4 control (0%) plots were established. The effects of selective thinning and dynamic changes on diameter structure stand growth were analyzed based on stand inventory of the 5-11th year

收稿日期: 2017-10-07 修回日期: 2018-02-20

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划课题“长白山次生林更新技术与示范”(2017YFC0504101)。

第一作者: 朱子卉。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: zzhlywt@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者: 杨华, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林资源监测与评价。Email: yanghua8747@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

after thinning. [**Result**] We found that medium thinning and heavy thinning had significantly increased the growth of basal area and stand volume, which conformed thinning program leading to faster stand growth because more space and nutrient were provided for standing trees after thinning. The diameter distribution (Weibull distribution) curves of control stand and medium thinning stand were right-skewed, which demonstrated small and medium trees dominated in these stands. While the diameter distribution curves of light thinning and heavy thinning stand were left-skewed which showed a higher number of bigger trees. The parameter c of Weibull function remained the same in unthinned stand, while it increased with time in thinned stands. This indicated thinning treatment optimized stand structure by removing inferior trees and increasing stand space. Simultaneously, thinning treatments could decrease tree mortality, however, heavy thinning increased the risks of wind throw. [**Conclusion**] Different selective thinning schemes can be applied to the forest according to the management goal. For sustainable management, medium thinning faster the stand growth, which also resulted in a stable diameter structure with higher DBH range and less tree mortality, hence medium thinning may promote sustainable forest development.

Key words: selective thinning; larch-spruce-fir mixed forest; diameter structure; stand growth; dynamic change

择伐是森林采伐收获方式之一,是森林经营的一项重要措施。采伐对森林的影响一直是众多学者研究的热点。以往研究发现通过采伐可影响林分生长、林分结构、森林生物多样性和森林碳储量等^[1-7]。采伐能明显促进林分生长^[8],在一定程度上,林分胸径和蓄积生长率随着采伐强度的增大而增大,已成为学术界较为统一的结论^[9-12]。关于采伐对林分直径结构的影响,董希斌等^[13]研究了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)采伐前后和不同采伐强度林分结构的变化。王蒙等^[14]分析了采伐后长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林直径分布的长期变化,并构建了基于采伐效应的直径分布动态参数预估模型。采伐对人工纯林的影响已有众多研究^[15-16]。本文研究对象为落叶松云冷杉近天然林,起源为在过伐后的天然云冷杉林内人工种植落叶松,又称为“人天林”。关于择伐对这类混交林的影响研究尚不多见^[17]。本研究对择伐后的落叶松云冷杉林林分直径结构和生长动态变化进行研究,为科学进行采伐活动和合理调整林木各径级株数结构提供参考。

1 研究区概况

研究区位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清林业局金沟岭林场(130°05′~130°20′E,43°17′~48°40′N),属长白山北麓。该区属温带大陆性季风气候,年均气温 3.9℃,年降水量 500~600 mm。地形以低山丘陵为主,海拔 300~1 200 m,坡度 5°~25°。林场内存海拔不同,土壤类型存在一定差异。山地土壤以暗棕壤为主,平缓地带多为白浆土,土壤疏松,根系较多,平均厚度 40 cm。研究区森林覆盖率达

98%,除落叶松人工林外,红松(*Pinus koraiensis*)阔叶林,以红松为主的针阔混交林,以云、冷杉为主的针叶林,以云、冷杉为主的针叶纯林为最常见的天然林类型。该研究区植被属于长白山区系。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究采用的实验样地为金沟岭林场 1986 年设定的 16 块落叶松云冷杉林固定样地。样地面积为 0.077 5~0.25 hm²。样地优势树种为人工种植的长白落叶松,以及自然更新的长白鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松、白桦(*Betula platyphyla*)、色木槭(*Acer mono*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、枫桦(*Betula costata*)、榆树(*Ulmus pumila*)等。林下灌木包括刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、暴马丁香(*Syringa amurensis*)和珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)等。草本植物多为苔草(*Carex siderosicra*)和山芹菜(*Spuriopimpinella brachycarpa*)。样地内落叶松为 1964—1967 年间人工栽植,并保留部分针阔树种。样地自建立后每 2~3 年进行复测调查,调查样地立地因子如海拔、坡向和坡度等,并对样地内直径大于 5 cm 的所有乔木进行每木检尺,记录树种、胸径、进界木、枯死木和更新苗等。于 2001 年对 16 块样地按 3 种择伐强度进行择伐,择伐强度以择伐蓄积量计算,设置轻度择伐(20%)、中度择伐(30%)、强度择伐(40%)和未择伐对照样地(0%)各 4 块。主要择伐树种为落叶松,同时以

去劣留优原则对其他针阔树种进行择伐。本研究数据为2006—2012年,即伐后5~11年间的调查数据(2006、2009、2012年),其中2009年只有11块调查样地。样地基本情况和择伐设置见表1。

表1 落叶松云冷杉固定样地情况及采伐强度
Tab.1 Statistic of larch-spruce-fir fixed sample stand and thinning intensity

样地号 Sample plot No.	择伐强度 Thinning intensity/%	面积/hm ² Area/ha	海拔 Altitude/ m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree/ (°)	平均胸径 Mean DBH/cm	密度/ (株·hm ⁻²) Density/ (tree·ha ⁻¹)	树种比例 Species composition
I-1	0	0.2	780	东北 Northeast	7	16.4	1 458	7 落2 云臭1 阔+红 7L2SF1C+P
I-2	0	0.25	620	西北 Northwest	6	16.9	1 168	6 落2 云臭1 红1 阔 6L2SF1P1C
I-3	0	0.112 5	660	东北 Northeast	7	16.8	1 440	6 落3 云臭1 红+阔 6L3SF1P+C
I-4	0	0.1	600	东北 Northeast	9	16.6	1 452	6 落3 云臭1 阔 6L3SF1C
II-1	20	0.077 5	760	东北 Northeast	10	16.8	1 432	5 落4 云臭1 阔+红 5L4SF1C+P
II-2	20	0.2	780	西 West	7	17.6	1 001	9 落1 阔 9L1C
II-3	20	0.25	670	西北 Northwest	6	20.2	784	6 落3 云臭1 阔+红 6L3SF1C+P
II-4	20	0.1	615	东北 Northeast	7	16.3	1 247	7 落2 云臭1 阔+红 7L2SF1C+P
III-1	30	0.2	780	西 West	18	17.4	968	6 落2 云臭2 阔+红 6L2SF2C+P
III-2	30	0.25	680	北 North	7	17.9	969	5 落4 云臭1 阔+红 5L4SF1C+P
III-3	30	0.1	645	北 North	7	17.2	1 098	6 落2 云臭1 红1 阔 6L2SF1P1C
III-4	30	0.1	605	东北 Northeast	9	18.8	820	10 落+红阔 10L+PC
IV-1	40	0.2	780	东北 Northeast	10	19.0	640	9 落1 阔+云臭 9L1C+SF
IV-2	40	0.25	680	西北 Northwest	10	18.5	875	5 落2 云臭2 阔1 红 5L2SF2C1P
IV-3	40	0.202 5	630	北 North	7	17.8	841	7 落2 云臭1 阔+红 7L2SF1C+P
IV-4	40	0.112 5	610	东北 Northeast	7	18.0	862	7 落2 云臭1 阔+红 7L2SF1C+P

注:表中L代表落叶松(*Larix olgensis*),SF代表鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)和臭冷杉(*Abies nephrolepis*),P代表红松(*Pinus koraiensis*),C代表阔叶树。Notes: L stands for *Larix olgensis*,SF stands for *Picea jezoensis* and *Abies nephrolepis*,P stands for *Pinus koraiensis*,C stands for broadleaves.

2.2 研究方法

2.2.1 单木材积与林分蓄积生长

本研究采用汪清县地方一元材积表^[18]计算各树种的材积,从而计算全林分和各树种组蓄积。具体公式如下。

落叶松:

$$V=0.000\ 266\ 34D_g^{2.205\ 16} \tag{1}$$

红松、冷杉和云杉等:

$$V=0.000\ 057\ 862D_g^{1.889\ 2}\left(40.463-\frac{1\ 171.3}{D_g+28}\right)^{0.987\ 55} \tag{2}$$

椴树、枫桦、山杨、白桦、榆树等:

$$V=0.000\ 053\ 309D_g^{1.884\ 52}\left(32.593-\frac{578.81}{D_g+17}\right)^{0.998\ 34} \tag{3}$$

色木槭:

$$V=0.000\ 048\ 841D_g^{1.840\ 48}\left(25.468-\frac{340.24}{D_g+13}\right)^{1.052\ 52} \tag{4}$$

式中: V 为单木材积, D_g 为单木胸径, P_n 为 n 年间的

平均生长率。

对林分断面积和蓄积生长率的计算采用普雷斯特生长率公式^[19]:

$$P_n=(y_a-y_{a-n})/(y_a+y_{a-n})\times200/n \tag{5}$$

式中: y_a 和 y_{a-n} 为 a 年和 $a-n$ 年的断面积或蓄积。

2.2.2 直径结构 Weibull 分布

三参数 Weibull 函数具有较大的偏度和峰度分布域,对各种直径分布拟合效果良好,被认为具有高度灵活性和适应性^[19]。对16块样地全林分和落叶松组直径分布数据进行拟合。Weibull 分布函数如下:

$$f(x)=\begin{cases}0 & x\leq1 \\ \frac{c}{b}\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1}\cdot\exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] & x>a,b>0,c>0\end{cases} \tag{6}$$

式中: a 为位置参数, b 为尺度参数, c 为形状参数, x 为林木胸径。

利用 Origin 9.0 软件进行数据统计整理,对林分断面积和蓄积生长量进行方差分析,并对林分直径分布进行拟合。

3 结果与分析

3.1 择伐对林分生长的影响

对样地伐后 5 年各时期林分生长率进行计算,结果见表 2。伐后 5~11 年间,对照样地林分断面积和蓄积生长率为 1.85% 和 2.08%,而择伐样地由择伐强度 (20%、30%、40%) 从小到大依次为 2.60%、2.68%、2.84% (断面积生长率) 和 2.68%、2.75%、3.19% (蓄积生长率),择伐样地的林分断面积和蓄积生长率均大于对照样地,表明择伐能显

著促进全林分的生长,但 3 种择伐强度间差异不显著。各树种组表现不一致,从数量上看,择伐样地的断面积和蓄积生长率均大于对照样地,且基本表现为同一趋势,即各树种以及全林分组断面积和蓄积生长率随着择伐强度增大而增大。不同强度的择伐对落叶松生长率影响差异不显著,而对其他针叶树和阔叶树影响差异显著。强度择伐样地的其他针叶树组和阔叶树组的断面积和蓄积生长率最高,分别为 3.39% 和 3.96%、3.94% 和 3.34%,且与对照样地和其他 2 种择伐强度有显著的差异。

表 2 伐后 5~11 年间林分生长率

Tab.2 Stand periodical annual increment during 5-11 years after thinning

择伐强度 Thinning intensity	全林分 Whole stand		落叶松 Larch		其他针叶树 Other conifers		阔叶树 Broadleaves	
	断面积 Basal area/%	蓄积 Volume/%	断面积 Basal area/%	蓄积 Volume/%	断面积 Basal area/%	蓄积 Volume/%	断面积 Basal area/%	蓄积 Volume/%
	Basal area/%	Volume/%	Basal area/%	Volume/%	Basal area/%	Volume/%	Basal area/%	Volume/%
对照 Control	1.85 ± 0.24a	2.08 ± 0.30a	2.13 ± 0.26a	2.32 ± 0.23a	1.25 ± 0.56a	1.46 ± 0.66a	1.78 ± 0.32a	2.26 ± 0.17a
轻度 Light	2.60 ± 0.36b	2.68 ± 0.43a	2.80 ± 0.60a	2.95 ± 0.70a	1.78 ± 0.37a	2.11 ± 0.38a	1.99 ± 0.30a	2.24 ± 0.15a
中度 Medium	2.68 ± 0.07b	2.75 ± 0.59a	3.04 ± 0.47a	2.98 ± 0.06a	2.55 ± 1.18a	2.98 ± 1.60a	2.05 ± 0.48a	2.28 ± 0.19a
强度 Heavy	2.84 ± 0.25b	3.19 ± 0.79a	2.82 ± 0.31a	3.11 ± 0.34a	3.39 ± 1.20b	3.96 ± 1.65b	3.94 ± 0.56b	3.34 ± 0.74b
F 值 F-value	7.643 53	1.656 60	1.180 64	0.932 25	13.465 71	7.493 56	5.750 86	3.648 85
P 值 P-value	0.017 93	0.318 41	0.406 71	0.513 53	0.004 50	0.024 29	0.041 14	0.077 29

注:表中数值为平均值 ± 标准差。不同字母之间差异显著 ($P < 0.05$),相同字母之间差异不显著 ($P > 0.05$)。Notes: the values in this table are mean ± standard deviation. There is significant difference between different letters ($P < 0.05$), and there is not significant difference between same letters ($P > 0.05$).

由图 1 可知:伐后不同时期,择伐样地的林分断面积和蓄积生长率均大于对照样地;伐后 5~9 年,中度择伐样地、强度择伐样地的林分断面积和蓄积生长率明显大于轻度择伐样地和对照样地;伐后 9~11 年,各择伐样地与对照样地林分生长率差异已不显著;伐后 5~9 年林分断面积和蓄积生长率大于伐后 9~11 年,即林分生长率呈递减趋势。

3.2 择伐对林分直径结构的影响

3.2.1 择伐对 Weibull 分布曲线的影响

从图 2 可以看出:随着时间的增加各样地 Weibull 分布曲线的最高峰位置逐渐向右移动 2 cm 左右;曲线峰值随林龄增大而逐渐减小,减小范围在 0.005~0.025 之间。对照样地的 Weibull 分布曲线形状由狭窄高峰逐渐转为宽广低峰,峰值由 0.13 降

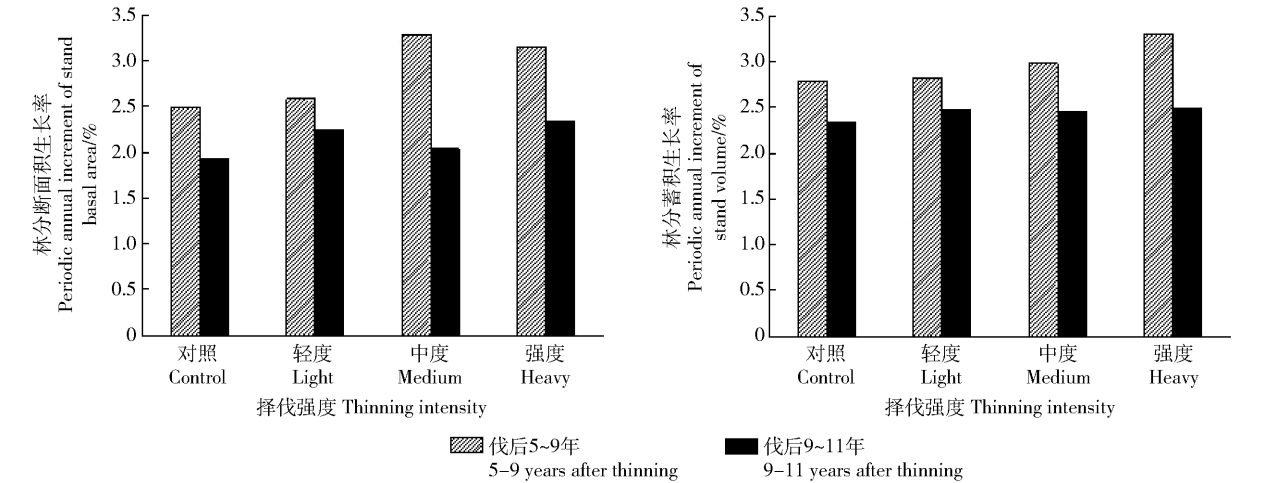


图 1 伐后不同时间林分断面积和蓄积生长率变化
Fig.1 Periodic annual increment (PAI) of basal area and volume during different periods after thinning

低至 0.105 左右,峰值位置从 16 cm 左右增加至 18 cm 左右。轻度择伐样地与强度择伐样地曲线形状变化趋势与对照样地相同,轻度择伐峰值由 0.135 降低至 0.12 左右,峰值位置从 23 cm 增加为 25.5 cm 左右;强度择伐峰值由 0.13 降低至 0.115 左右,

峰值位置从 25 cm 增加为 27 cm。中度择伐样地曲线较宽广,形状变化不明显,峰值由 0.11 微弱减小,峰值位置由 18 cm 左右向右移动 2 cm,峰值位置与林分平均直径相近。

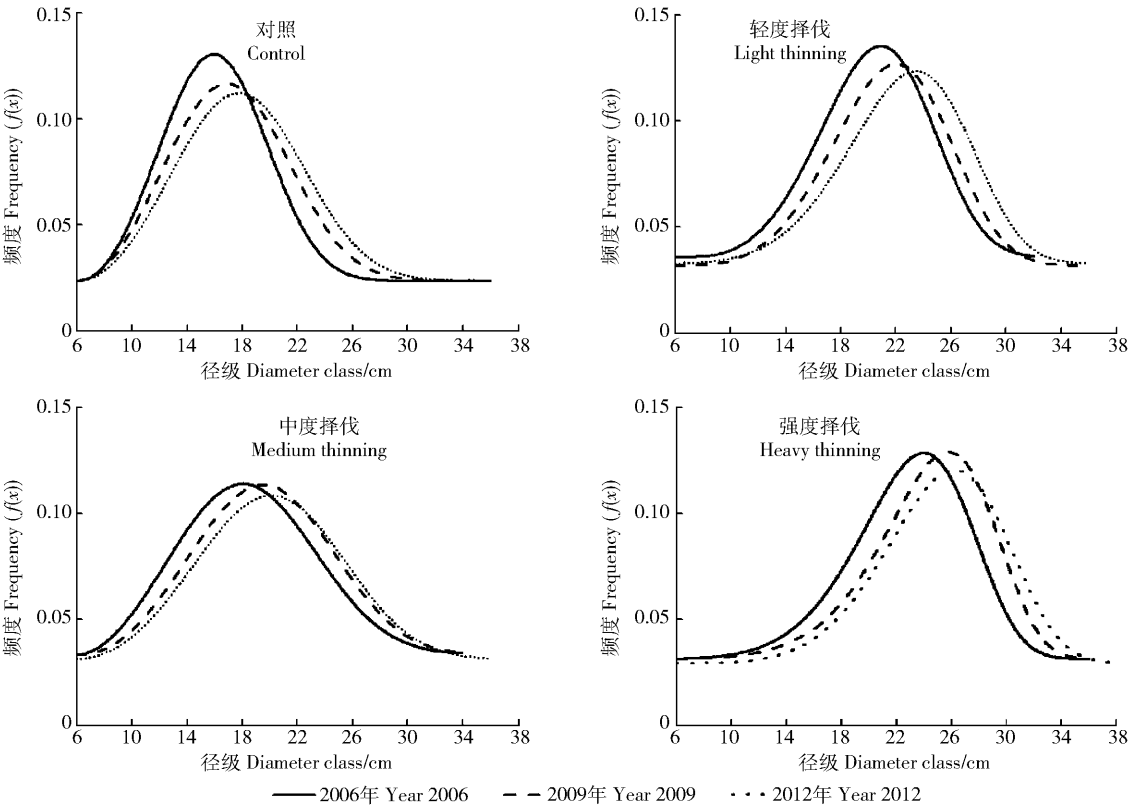


图2 伐后林分直径结构分布变化

Fig.2 Weibull distribution curves of stand diameter structure after thinning

由图3可以看出:择伐后11年(2012年),轻度择伐和强度择伐样地的曲线峰值均高于对照样地,且较狭窄;中度择伐样地较其他3种样地峰值较低,径级范围宽广;择伐样地峰值位置均比对照样地偏右,强度择伐曲线向右移动距离最大,轻度择伐次之,向右移动距离最小的是中度择伐曲线。伐后11年,对照样地小径材数量最多;轻度择伐样地中大径材居多;中度择伐样地径级范围较广,中小径材数量较多;强度择伐样地中小径材数量很少,大径材占绝对优势。

3.2.2 择伐对 Weibull 分布函数三参数的影响

由表3可知:Weibull分布概率密度函数位置参数 a 值的范围为5.52~7.99;对照样地 a 值保持不变, a 值受择伐影响较大。轻度择伐样地和中度择伐样地的 a 值有降低的趋势,且轻度择伐降低最明显;强度择伐样地 a 值先增大后稍减小。尺度参数 b 值的范围为11.28~23.83,除强度择伐样地 b 值先减小后增大以外,其余样地的 b 值均随时间增加而增大,择伐样地的 b 值均大于对照样地。Weibull

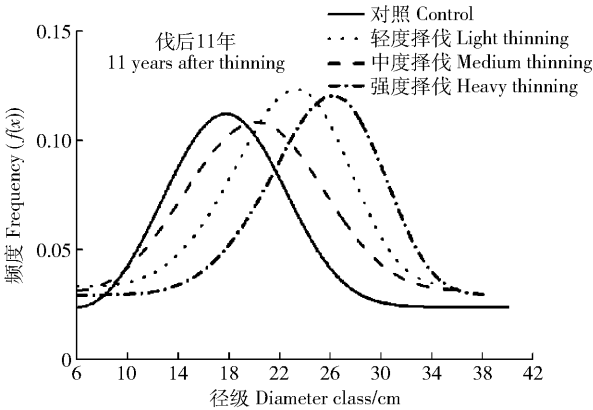


图3 伐后11年择伐样地与对照样地 Weibull 分布曲线

Fig.3 Weibull distribution curves of thinning plots and control 11 years after thinning

分布函数形状参数 c 值的范围为2.87~5.17,对照样地和中度择伐样地直径分布曲线为右偏山状曲线,轻度择伐样地和强度择伐样地则为左偏山状曲线。伐后5~11年,对照样地的 c 值变化不大,除中度择伐样地伐后5年 c 值小于对照样地外,其余择

伐样地的 c 值均大于对照样地,且随时间的增加呈增大趋势,其中轻度择伐样地和强度择伐样地与对照样地差异较大,中度择伐样地与对照样地差异较小。

表 3 择伐后林分直径结构参数变化

Tab. 3 Weibull distribution of stand diameter structure parameters of thinning plots and control

伐后时间/a Year after thinning/year	对照 Control			轻度择伐 Light thinning			中度择伐 Medium thinning			强度择伐 Heavy thinning		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
5	5.99	11.28	3.09	7.97	15.94	4.18	5.96	14.05	2.87	5.98	22.64	4.83
8	5.98	12.52	2.97	7.96	17.04	4.24	5.86	15.40	3.18	7.99	22.28	4.75
11	5.99	13.43	3.03	6.77	19.52	4.67	5.52	16.34	3.25	5.74	23.83	5.17

3.3 择伐对林木死亡率的影响

伐后 5 ~ 11 年,轻度、中度、强度择伐的死亡率分别为对照样地的 70.37%、53.83%、101.44%。林木死亡原因主要是自然枯损和风倒或风折,死亡木主要为落叶松。对照样地、轻度和中度择伐样地死亡木以枯损木为主,轻度、中度择伐样地林木枯死率明显小于对照样地。由此可见,一定程度的择伐可以明显减少林木枯损。强度择伐样地表现出较高的死亡率,其风倒木占死亡林木总数的一半以上。

4 结论与讨论

本文分析了不同强度择伐后落叶松云冷杉混交林的生长动态。研究发现,伐后 5 ~ 11 年,择伐样地的林分断面积和蓄积生长率均大于对照,说明择伐能显著促进林分生长。随着择伐强度的增强,择伐样地各树种组林分断面积和蓄积生长率增大,原因是林分择伐后,林内光照增加,且单木间对林分、土地、水和养分的竞争减小,保留木生长得到促进^[10,12,20~21],择伐强度越大,光照越充足且竞争越小,生长率增大。伐后 5 ~ 11 年,林分生长率呈递减趋势,符合林分生长规律。择伐对各树种组生长影响不同,对全林分及落叶松断面积和蓄积生长影响不显著,对其他针叶树组和阔叶树组则影响显著。原因可能是样地内云、冷杉以及红松和阔叶树为天然更新,分布较散,不同强度择伐对其光照和周围树木影响较大,且阔叶树平均直径偏小,株数较少,其生长受不同强度择伐影响较大。总之,通过择伐,为林分中保留木创造养分空间,一定时间和程度上加速了林分胸径和蓄积的生长;从数量上看,中度、强度择伐对落叶松云冷杉混交林各树种生长促进作用较明显。另外,择伐可能改变了林分的混交度,部分树种生长对混交的强弱程度比较敏感^[22]。

本文还研究了择伐对林分直径结构的影响。天然混交异龄林直径结构一般呈双峰山状曲线或不规则山状曲线^[19],也有反 J 形曲线分布,陈亚南等^[23]研究得出落叶松云冷杉林直径分布曲线为多峰曲

线,而本研究的落叶松云冷杉混交林直径结构采用单峰 Weibull 分布概率密度函数拟合, R^2 在 0.64 ~ 0.82 之间,各样地拟合精度较高。其原因在于本研究将主要树种组落叶松和其他针叶树种看作两个林分因子,而这两个林分因子在研究时间内平均直径相近,且长势差异不大,因此林分直径分布呈单峰山状曲线。随林龄增大,由于各树种间生长速率的差异,落叶松云冷杉林直径分布曲线将由现阶段的单峰分布转变为双峰或不规则分布。

不同择伐强度对样地直径结构的影响不同^[14,17]。择伐后 5 ~ 11 年,各样地林分直径 Weibull 分布曲线最高峰均向右移动 2 cm 左右。择伐样地峰值均比对照样地靠右,且呈左偏;除中度择伐样地外,轻度和强度择伐峰度较对照样地高且较狭窄。Weibull 分布形状参数 c 值尤为重要,一般人工林由于林木胸径生长受生长空间影响,林分直径分布曲线 c 值随林龄增大而减小^[13]。 c 值减小则分布曲线呈正偏,林分中直径小的林木增多,应通过择伐尽量使 c 值增大,去除劣势木,增加林分生长空间。本研究中对对照样地的 c 值随时间变化不大,而择伐样地的 c 值几乎都有随时间增大的趋势,因此,落叶松云冷杉林择伐后都能得到比对照样地更好的林分结构。伐后 11 年,对照样地小径材数量最多,轻度择伐样地中大径材居多,中度择伐样地径级范围较广,中小径材数量较多;强度择伐样地中小径材数量很少,大径材数量最多。与前人研究结果^[14]不同,本研究中林分直径 Weibull 分布并未随择伐强度的变化呈现出明显的规律,这可能是因为择伐策略不同。从图 3 可以看出,中度择伐中最小径级树木未全采伐;轻度、强度择伐样地最小径级树木皆被采伐,且择伐率随径阶增大而减小,直径大的林木株数增多。因此,可根据不同经营目的选择适当的择伐策略,调整径级结构^[24]。从可持续经营角度看,中度择伐后落叶松云冷杉林林木径级较完整,林分结构稳定,有利于林分生长的可持续发展^[25]。

研究样地内树木死亡原因主要为自然枯损和受

自然灾害影响。由于林分生长过程中林木直径和树冠扩张,使得林木对林分内营养空间的竞争加剧,必然会出现由于养分不足,导致生长不良而枯死的林木,即自然稀疏现象^[26]。通过合理择伐使得保留木的养分空间扩大,减少因养分竞争引起的枯损木数量的增加。对林分内死亡林木进行统计分析,发现林分内死亡林木主要为落叶松。轻度、中度择伐样地林木死亡率小于对照样地,而强度择伐样地与对照样地相同,这与尤文忠等^[27]研究发现枯损木随择伐强度增大而减少不同。其原因在于本研究区2012年8月(2012年样地复查时间为9月)受台风“布拉万”影响严重,强度择伐林分内风倒木数量较多。高强度择伐会增加林木风倒的风险^[28],因此,一定强度择伐能减少林木枯损,提高林分质量,但是仍需不断寻找更佳的经营措施来适应气候变化带来的影响。

参 考 文 献

- [1] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 等. 不同采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.
Huang X M, You Y M, Lan J C, et al. The effect of carbon storage and its allocation in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different thinning intensities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 156-163.
- [2] 高云昌, 张文辉, 何景峰, 等. 黄龙山油松人工林采伐效果的综合评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1313-1319.
Gao Y C, Zhang W H, He J F, et al. Effects of thinning intensity on *Pinus tabulaeformis* plantation in Huanglong Mountain, Northwest China: a comprehensive evaluation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1313-1319.
- [3] Forrester D I, Collopy J J, Beadle C L, et al. Interactive effects of simultaneously applied thinning, pruning and fertiliser application treatments on growth, biomass production and crown architecture in a young *Eucalyptus nitens* plantation [J]. Forest Ecology & Management, 2012, 267(3): 104-116.
- [4] Verschuyt J, Riffell S, Miller D, et al. Biodiversity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests: a meta-analysis [J]. Forest Ecology & Management, 2011, 261(2): 221-232.
- [5] Horner G J, Baker P J, Nally R M, et al. Forest structure, habitat and carbon benefits from thinning floodplain forests: managing early stand density makes a difference [J]. Forest Ecology & Management, 2010, 259(3): 286-293.
- [6] He Z, Zhao W, Hu L, et al. Successional process of *Picea crassifolia*, forest after logging disturbance in semiarid mountains: a case study in the Qilian Mountains, northwestern China [J]. Forest Ecology & Management, 2010, 260(3): 396-402.
- [7] 孙志虎, 王秀琴, 陈祥伟. 不同抚育间伐强度对落叶松人工林生态系统碳储量影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(12): 1-13.
Sun Z H, Wang X Q, Chen X W. Effects of thinning intensity on carbon storage of *Larix olgensis* plantation ecosystem [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 1-13.
- [8] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 等. 干扰树采伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 340-348.
Wu J Q, Wang Y X, Yang Y, et al. Effects of crop tree release on stand growth and stand structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(2): 340-348.
- [9] 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 采伐对落叶松云冷杉混交林的影响[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 78-85.
Lei X D, Lu Y C, Zhang H R, et al. Effects of thinning on mixed stands of *Larix olgensis*, *Abies nephrolepis* and *Picea jezoensis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 78-85.
- [10] 贾忠奎, 公宇宁, 姚凯, 等. 采伐强度对塞罕坝华北落叶松人工林生长进程和生物量的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 5-7, 31.
Jia Z K, Gong N N, Yao K, et al. Effects of thinning intensity on the growth and biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba, Hebei Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(3): 5-7, 31.
- [11] Nilsson U, Agestam E, Ekö P M, et al. Thinning of Scots pine and Norway spruce monocultures in Sweden [J]. Studia Forestalia Suecica, 2010, 219: 1-46.
- [12] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度采伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(5): 1-9.
Ma L Y, Lin C Y, Wang X Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas [J]. Scientia Silvae Sinica, 2007, 43(5): 1-9.
- [13] 董希斌, 李耀翔, 姜立春. 采伐对兴安落叶松人工林林分结构的影响[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(1): 16-18.
Dong X B, Li Y X, Jiang L C. The effects of thinning on stand structure for larch plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(1): 16-18.
- [14] 王蒙, 李凤日. 基于采伐效应的落叶松人工林直径分布动态模拟[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2429-2437.
Wang M, Li F R. Modeling the diameter distribution of *Larix olgensis* plantation based on thinning effects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2429-2437.
- [15] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 采伐对森林生长的影响及其模型研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 636-641.
Li C M, Du J S, Zhang H R. The effects of thinning on forest growth and model study [J]. Forest Research, 2003, 16(5): 636-641.
- [16] 杜纪山, 唐守正. 抚育间伐对林分生长的效应及其模型研究[J]. 北京林业大学学报, 1996, 18(1): 79-83.
Du J S, Tang S Z. Modeling thinning effects on stand growth [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1996, 18(1): 79-83.
- [17] Lei X D, Lu Y C, Peng C H, et al. Growth and structure development of semi-natural larch-spruce-fir (*Larix olgensis*-*Picea jezoensis*-*Abies nephrolepis*) forests in northeast China: 12-year

- results after thinning [J]. *Forest Ecology & Management*, 2007, 240(1):165-177.
- [18] 胡云云. 基于采伐的长白山地区天然云冷杉针阔混交林生长和结构动态的研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- Hu Y Y. Study on dynamic of stand growth and structure for spruce-fir mixed forest after selective cutting in Changbai Mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University,2010.
- [19] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006: 73-87, 192.
- Meng X Y. Forest measurement [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006: 73-87,192.
- [20] 张鹏,王新杰,韩金,等. 采伐对杉木人工林生长的短期影响[J]. 东北林业大学学报,2016,44(2):6-10,14.
- Zhang P, Wang X J, Han J, et al. Short-term effect of thinning on the growth of Chinese fir plantation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(2):6-10,14.
- [21] 蒋子涵,金光泽. 择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响[J]. 生态学报,2010,30(21):5843-5852.
- Jiang Z H, Jin G Z. Effects of selection cutting on diameter growth and vertical growth among major tree species in the mixed broadleaved-Korean pine forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21):5843-5852.
- [22] 吕延杰,杨华,张青,等. 云冷杉天然林林分空间结构对胸径生长量的影响[J]. 北京林业大学学报,2017,39(9):41-47.
- Lü Y J, Yang H, Zhang Q, et al. Effects of spatial structure on DBH increment of natural spruce-fir forest[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(9):41-47.
- [23] 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.
- Chen Y N, Yang H, Ma S Y, et al. Spatial structure diversity of semi-natural and plantation stands of *larix gmelinii* in Changbai Mountain, northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(12):48-58.
- [24] 姚甲宝,曾平生,袁小平,等. 采伐强度对木荷-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.
- Yao J B, Zeng P S, Yuan X P, et al. Impacts of thinning intensities on growth and stand structure of *Schima superba*-sprouting *Cunninghamia lanceolata* mixed plantation [J]. *Forest Research*, 2017, 30(3):511-517.
- [25] 武纪成. 落叶松云冷杉林结构特征及调整研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2008.
- Wu J C. Study on structure and adjustment of larch-spruce-fir mixed stands [D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry, 2008.
- [26] 韩文轩,方精云. 植物种群的自然稀疏规律: $-3/2$ 还是 $-4/3$? [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008,44(4):661-668.
- Han W X, Fang Y J. Self-thinning law in plant populations: $-3/2$ vs $-4/3$ [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008,44(4):661-668.
- [27] 尤文忠,赵刚,张慧东,等. 采伐对蒙古栎次生林生长的影响[J]. 生态学报,2015,35(1):56-64.
- You W Z, Zhao G, Zhang H D, et al. Effects of thinning on growth of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(1):56-64.
- [28] Wallentin C, Nilsson U. Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden [J]. *Forestry*, 2014, 87(2):229-238.

(责任编辑 冯秀兰
责任编辑 张会儒)