

DOI: 10.5846/stxb201405040876

包也, 于大炮¹, 周莉, 周旺明, 孟莹莹, 吴志军, 郭焱, 王晓雨, 代力民. 择伐对阔叶红松林资源可持续利用的影响. 生态学报, 2015, 35(1): 0031-0037.

Bao Y, Yu D P, Zhou L, Zhou W M, Meng Y Y, Wu Z J, Guo Y, Wang X Y, Dai L M. Influence of selection cutting on sustainable timber production of a broadleaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest on Changbai Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0031-0037.

择伐对阔叶红松林资源可持续利用的影响

包 也^{1,2}, 于大炮¹, 周 莉¹, 周旺明¹, 孟莹莹^{1,2}, 吴志军^{1,2}, 郭 焱^{1,2}, 王晓雨^{1,2},
代力民^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110164

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 科学评估目前的择伐方式对森林结构与功能的影响对区域森林资源的可持续利用具有重要意义。以择伐过的阔叶红松林为研究对象, 并以原始林为对照, 分析了择伐对物种组成、林分结构以及对木材生产的影响。结果表明, 低强度择伐($\leq 20\%$)对物种组成和蓄积结构均没有显著影响, 而高强度择伐则显著改变了物种组成和蓄积结构。择伐后林分蓄积量均显著小于原始林, 不同择伐强度间没有显著差异。择伐显著影响了用材树种的数量和质量, 导致择伐后样地中用材树种的株数和蓄积量均显著减少, 严重影响了林分的木材持续生产能力。因此, 从阔叶红松林木材可持续利用角度来看, 需要重新思考红松不作为采伐树种的用材林经营技术模式。

关键词: 择伐; 阔叶红松林; 可持续利用; 林分收获量; 森林结构

Influence of selection cutting on sustainable timber production of a broadleaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) forest on Changbai Mountain

BAO Ye^{1,2}, YU Dapao¹, ZHOU Li¹, ZHOU Wangming¹, MENG Yingying^{1,2}, WU Zhijun^{1,2}, GUO Yan^{1,2}, WANG Xiaoyu^{1,2}, DAI Limin^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Shenyang 110164, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: For sustainable timber production from regional forests, it is important to evaluate the influence of selection cutting on forest structure and function. In the present study, we analyzed changes in species composition, stand structure, and timber production after partial harvest of a broadleaved Korean pine forest on Changbai Mountain. We showed that the species composition and stand structure varied markedly after a high-intensity cut, but were less affected by a low-intensity cut ($\leq 20\%$). In addition, we determined a clear decrease in stand volume of the forest, but no marked difference between high- and low-intensity cuts. Selection cutting affected the number and quality of commercial trees and caused a marked decrease in the volume of commercial timber. Our results imply that selection cutting has a deleterious influence on sustainable timber production. Thus, timber production without selection cutting of *Pinus koraiensis* should be considered.

Key Words: selection cutting; broadleaved and Korean pine forest; sustainable timber production; forest harvest; forest structure

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD22B04); 森林与土壤生态国家重点实验室自主重大项目(LESE203-12)

收稿日期: 2014-05-04; 修订日期: 2014-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

森林作为陆地生态系统的主体,对人类生存和发展具有重要的意义,所以合理的经营方式尤为重要。目前,森林经营强调维持或恢复林分结构^[1,2],并向着不仅要维持木材产量,而且要发挥森林的多种生态功能方向转变^[3]。从该意义来看,择伐比皆伐更有利于维持生物多样性和生态功能^[4-5],但不同择伐强度对森林的影响也不同。国内外关于择伐对林分生长、物种组成和物种多样性影响的研究较多。多数学者认为小范围的择伐能改善林内光照和温度条件,因此有利于林木的生长^[6-8]。不同择伐强度对物种组成的影响不同,较低强度(30%以下)择伐对物种组成影响较小,而较高强度(40%以上)择伐则会使其发生明显的变化^[9-10]。并且,择伐干扰后林内乔木物种丰富度也减小^[11-12]。此外,也有关于择伐对森林生态系统固碳影响的研究,齐麟等^[13]通过研究择伐后阔叶红松林生态系统碳密度,发现在短期内择伐导致植被、土壤的碳密度减小,而随着植被的恢复,生态系统碳密度增加。

阔叶红松林是东北东部山区典型的地带性植被,但由于长期不合理的森林经营,导致原始阔叶红松林大面积消失,仅有为数不多的原始阔叶红松林分布于长白山地区。而长白山林区又是东北地区重要的木材生产基地,因此如何实现长白山阔叶红松林的可持续经营成为广大学者和森林经营管理工作日益关注的问题。从20世纪50年代,我国开始对阔叶红松林择伐^[14],经历了由径级择伐到采育择伐、弱度择伐,到目前正在实行的不采红松只采伐蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等阔叶树(目的是保护阔叶红松林资源)的过程。然而,该经营方式能否使森林健康发展,备受关注。故近几年对阔叶红松林经营的研究相对较多,主要集中于择伐对阔叶红松林主要树种生长的影响^[15]、择伐对阔叶红松林生物量和碳密度的影响^[16]及对生物多样性^[11]影响等方面。而关于该经营方式对森林结构产生怎样的影响,以及其能否使木材可持续利用的研究非常少。故本研究选择长白山地区具有典型代表性的露水河林业局,以经过择伐后的阔叶红松林为研究对象,分析择伐对阔叶红松林结构和木材生产的影响,为制定合理的森林经营措施提供参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于长白山自然保护区西北部的吉林省露水河林业局(127°29'—128°02' E, 42°24'—42°49' N),是典型的阔叶红松林分布区。平均海拔为600—800 m。该地区属于寒温带大陆性气候,降水季节变化显著,降水多集中在7—8月份,年降雨量800—1040 mm,平均相对湿度为70%—75%,年平均气温达0.9—1.5℃。土壤成土母质主要为花岗岩、玄武岩、少部分为沉积岩。该局自1998年开始实施天然林保护年工程,面积12.1万hm²,其中45%为商品林,每年木材产量为6.5万m³。森林类型为经过多次采伐后形成的天然林次生林或派生林,是吉林省森林资源保存最好的林业局之一。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2012年在露水河林业局,选择海拔、坡度和坡位等条件相同,择伐强度(以蓄积比例计)不同的次生林设置样地,并以原始阔叶红松林(未择伐)为对照(CK)。用T0表示采伐强度为20%的样地,T1表示采伐强度为40%的样地,T2表示经过40%的采伐后,又进行了10%强度的采伐的样地,每个样地类型设4块面积为50m×100m的样方。详细调查和记录各样地中胸径(DBH)≥2 cm的木本植物的种类和胸径,样地具体信息见表1。

1.2.2 蓄积量计算

根据吉林省一元立木材积表(2003年)按不同树种组(针叶:包括红松、云杉(*Picea jezoensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、长白落叶松(*Larix olgensis* var. *changpaiensis*)及其它针叶树;一类阔叶:包括水曲柳、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、枫桦(*Betula costata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*);二类阔叶:

包括色木、杂木;蒙古栎(*Quercus mongolica*))计算蓄积量。

1.2.3 用材树种

自 2000 年以来,该局采伐的树种主要是蒙古栎、水曲柳、春榆和紫椴(占总量的 95%以上),故本文称以上 4 个树种为用材树种。根据森林择伐技术规程的规定,样地中 DBH≥40 cm 的用材树木被称为目前可采伐的林木。

1.2.4 数据分析

采用 Excel2007 进行数据计算和统计,SPSS16.0 进行单因素方差分析(One way ANOVA)和 Duncan 法进行差异性比较,利用 Origin8.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 择伐对森林物种组成的影响

对 4 个样地上所有 DBH≥2 cm 乔木分析后发现,择伐强度对阔叶红松林物种组成和胸高断面积有很大的影响(表 2)。原始林中 DBH≥2 cm 个体的总胸高断面积为 44.72 m²/hm²,择伐后样地总胸高断面积均小于原始林,且择伐强度越大胸高断面积减少的越多。其中经过两次择伐以后,样地的总胸高断面积仅为原始林的 47.5%,林地上可采伐的林木仅为原始林的 33.9%,为低强度择伐林的 52.6%。

表 2 各样地物种胸高断面积/(m²/hm²)

Table 2 Basal area of tree species in different plots				
树种 Species	CK	T0	T1	T2
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	17.99	13.27	6.88	6.62
紫椴 <i>Tilia amurensis</i>	8.27	3.63	3.54	1.97
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	6.27	3.58	2.25	1.29
水曲柳 <i>Fraxinus mandschurica</i>	3.29	2.95	0.81	0.47
假色槭 <i>Acer pseudo-sieboldianum</i>	2.48	2.76	0.42	0.4
色木槭 <i>Acer mono</i>	1.79	2.32	6.29	1.99
春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i>	1.33	2.19	0.62	2.77
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	0.73	0.87	0.23	0.71
枫桦 <i>Betula costata</i>	0.65	1.05	0	2.74
青楷槭 <i>Acer tegmentosum</i>	0.57	0.51	0.08	0.3
柳 <i>Salix matsudana</i>	0.47	0	0.05	0.14
千金榆 <i>Carpinus cordata</i>	0.4	0.02	0	0
暴马丁香 <i>Syringa reticulata</i>	0.23	0.19	0.07	0.23
花楷槭 <i>Acer ukurunduense</i>	0.14	0.42	0	0.03
其他树种	0.12	0.29	9.77	1.59
合计 Total	44.72	34.05	31.01	21.24

其他树种:白牛槭、稠李、臭冷杉、灯台树、黄杨、接骨木、毛榛、拧劲槭、沙松、山槐、鼠李、小楷槭和云杉

原始林中胸高断面积大于 1 m²/hm²的乔木有 7 种,占样地总胸高断面积的 92.6%。其中红松胸高断面积占 40.7%,紫椴、蒙古栎和水曲柳之和占总的 39.9%,说明这 4 个种在原始植被群落中占据绝对优势。择伐强度对树种胸高断面积比例影响不同。低强度的 T0 与原始林差异不大,样地中胸高断面积大于 1 m²/hm²的乔木有 8 种。其中红松占 39.0%,紫椴、蒙古栎、水曲柳胸高断面积之和占 29.8%。春榆在该样地上的比例比原始林略高,达到 6.4%。高强度择伐的 T1 与原始林差异较大,该样地中仅有 4 个种的胸高断面积大于 1 m²/hm²,其中红松占 22.2%,紫椴、蒙古栎和水曲柳之和占 21.3%,且色木槭和其他树种的比例最大,占 51.8%。

经过第二次采伐后的 T2, 红松比例增加到 31.25%, 而紫椴、蒙古栎、水曲柳仅为 17.6%, 春榆的比例在该样地中最大, 达到 13%。低强度择伐基本能保持原有的物种组成, 样地上可采伐的林木资源较多。

2.2 择伐对林分蓄积结构的影响

对各样地中主要树种蓄积分析发现, 择伐强度对主要树种蓄积量影响较大(表 3)。原始林林分总蓄积为 452.97 m³, 择伐样地林分蓄积量均小于原始林, 且择伐强度越大林分蓄积量减少的越多。其中经过两次择伐的样地林分蓄积量仅为原始林的 52.9%, 林地上可采伐的林木仅占原始林的 47.0%, 为低强度择伐林的 72.8%。

原始林中红松蓄积量为 218.69 m³, 占林分总蓄积量的 48.3%, 紫椴、蒙古栎、水曲柳和春榆蓄积之和为 183.01 m³, 占总蓄积的 40.4%。择伐强度对蓄积量比例影响不同。低强度的 T0 红松蓄积量为 165.56 m³, 占总蓄积的 48.6%, 略高于原始林(或与原始林差异不大), 紫椴、蒙古栎、水曲柳和春榆蓄积之和为 118.07 m³, 比例为 34.7%, 低于原始林。高强度择伐的 T1 与原始林差异较大, 红松蓄积量为 83.77 m³, 比例为 25.6%, 紫椴、蒙古栎、水曲柳和春榆蓄积之和为 77.04 m³, 比例为 23.5%。经过两次择伐的 T2, 红松蓄积为 77.84 m³, 比例为 32.5%, 紫椴、蒙古栎、水曲柳和春榆蓄积之和为 85.96 m³, 比例为 35.9%。原始林、T0、T1 和 T2 的红松与用材树种蓄积比分别为 1.19、1.40、1.09 和 0.91。可见低强度择伐使该比例升高, 而高强度择伐使之降低, 且经过两次择伐的 T2 样地该比例小于 1。

2.3 择伐对森林木材生产量的影响

2.3.1 林分株数和蓄积的变化

择伐后样地林分株数均少于原始林, 且采伐强度越大, 株数减少的越多(图 1)。低强度择伐对林分株数影响较小, 其样地中林分株数仅减少了 5.8%, 林分株数与原始林没有显著差异。而高强度择伐则显著减少林分株数, T1 林分株数减少了 28.8%, 显著低于原始林。尤其是经过两次择伐的 T2, 其林分株数减少了 43.2%, 显著低于原始林和低强度择伐林。

择伐后样地林分蓄积量均低于原始林, 且采伐强度越大, 蓄积减少的越多(图 3)。低强度择伐对林分蓄积量影响较小, 仅减少 7.44 m³。高强度择伐对林分蓄积量影响较大, T1 样地林分蓄积量减少 178.70 m³, 但与其他样地没有显著差异。而经过两次择伐的样地林分蓄积量减少了 236.06 m³, 其林分蓄积量最小, 仅为原始林蓄积量的 46.7%, 是低强度择伐林的 47.5%, 与二者差异达到显著水平。

2.3.2 用材树株数和蓄积的变化

择伐对用材树种和红松株数没有显著影响(图 1),

表 3 各样地树种蓄积量/(m³/hm²)

Table 3 Volume of tree species in different plots

树种 Species	CK	T0	T1	T2
红松	218.69	165.56	83.77	77.84
紫椴	84.33	36.81	39.35	31.82
蒙古栎	51.19	29.69	19.41	13.23
水曲柳	33.93	29.44	9.78	12.90
色木	29.59	36.27	48.40	19.46
春榆	13.56	22.13	8.50	28.01
枫桦	6.24	10.33	0	35.02
白桦	5.99	7.22	3.47	5.56
山杨	0.34	0	89.27	9.30
黄檗	0.06	0	2.23	0.20
胡桃楸	0	0.40	6.78	0.14
其他树种	9.06	2.56	16.82	6.04
合计	452.97	340.41	327.78	239.52

色木: 青楷槭、色木槭、假色槭、拧劲槭、花楷槭、白牛槭和小楷槭;
其他树种: 暴马丁香、稠李、臭冷杉、灯台树、黄杨、接骨木、柳、毛榛、千金榆、沙松、山槐、鼠李和云杉; CK、T0、T1、T2 为样地类型(表 1)

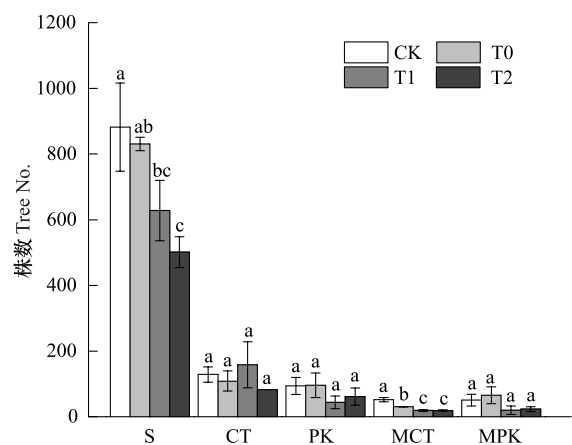


图 1 各样地主要树种株数

Fig.1 Number of individuals of main species in different plots

S: 林分 stand, CT: 用材树种 cutting tree species, PK: 红松 *Pinus Koraiensis*, MCT: 目前可采伐的用材树种 merchantable cutting tree species, MPK: 目前可采伐的红松 merchantable *Pinus Koraiensis*; 不同小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

对它们的株数比例也没有显著影响(图2)。择伐显著减少用材树种蓄积(图3),T0、T1和T2处理用材树种蓄积分别比原始林减少了51.96、89.58 m³和102.25 m³,可见择伐强度越大,用材树种蓄积减少的越多,但各择伐处理间用材树种蓄积没有显著差异。择伐强度对红松蓄积量影响不同,低强度择伐使红松蓄积量增加,而高强度择伐则使其减少。择伐后样地红松蓄积量与原始林没有显著差异,而择伐处理间T1处理显著低于T0处理。择伐对红松蓄积量比例与对红松蓄积量影响相同,低强度择伐使红松蓄积量比例增加,而高强度择伐则使其减少。择伐后样地红松蓄积量比例与原始林没有显著差异,而择伐处理间T1处理显著低于T0处理。

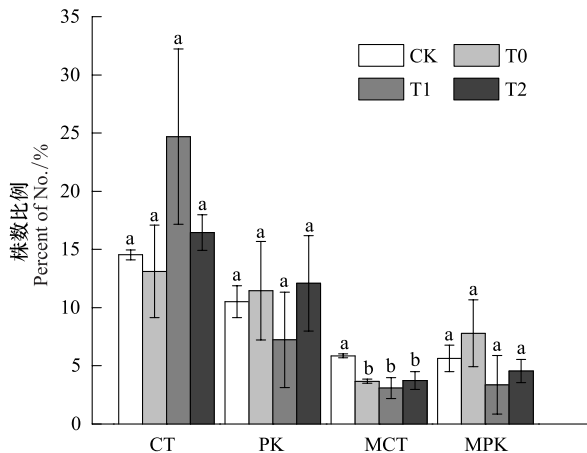


图2 主要树种株数比例

Fig.2 Proportion of main species' numbers

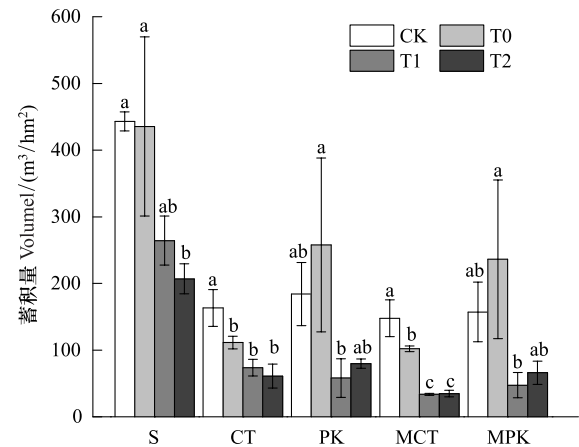


图3 各样地主要树种蓄积

Fig.3 Volume of main species in different plots

择伐对目前可采伐的红松株数和株数比例没有显著影响(图1,图2),低强度择伐使二者增大,高强度择伐使其减小,但择伐后样地目前可采伐的红松株数和株数比例与原始林没有显著差异。原始林中目前可采伐的用材树种株数为52株,占样地总树种比例为5.85%(图1)。T0、T1和T2中目前可采伐的用材树种株数分别是31、19和19株,占样地总株数比例分别为3.67%、3.09%和3.73%。可见择伐使样地中用材树种株数显著减少,且采伐强度越大,株数减少的越多,T0、T1和T2中目前可采伐的用材树种株数分别占原始林的59.6%、36.5%和36.5%。择伐也显著降低了目前可采伐用材树种的株数比例,T0、T1和T2处理目前可采伐用材树种的株数比例分别比原始林减少了2.18%、2.76%和2.12%,择伐后样地目前可采伐的用材树种株数较少。

择伐减少目前可采伐的用材树种蓄积,且强度越大,减少的越多(图3)。择伐后样地目前可采伐的用材树种蓄积显著小于原始林,且低强度择伐处理也显著高于高强度择伐处理。

原始林中目前可采伐的用材树种蓄积为147.64 m³,占总蓄积的33.25%。T0的目前可采伐的用材树种蓄积为102.00 m³,占总蓄积比例为24.75%,比原始林减少了45.64 m³,是原始林目前可采伐的用材树种蓄积的69.1%。T1的目前可采伐的用材树种蓄积为33.72 m³,占总蓄积比例为12.85%,比原始林减少了113.93 m³,仅为原始林的22.8%,是低强度择伐林的33.1%。T2的目前可采伐的用材树种蓄积为34.69 m³,占总蓄积比例为

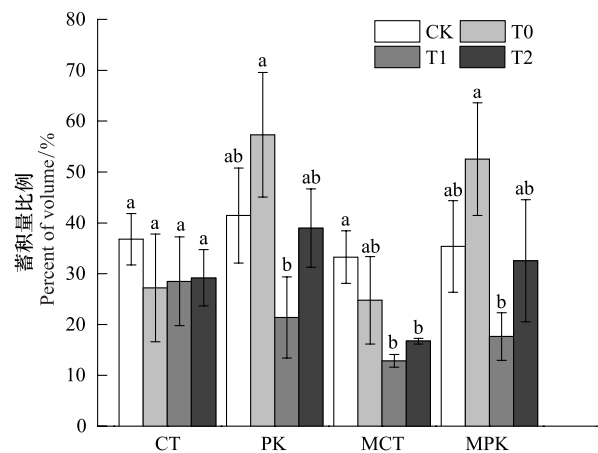


图4 主要树种蓄积比例

Fig.4 Proportion of main species' volume

16.74%,比原始林减少了 112.95 m³,仅是原始林的 23.5%,是低强度择伐林的 34.0%。择伐也减少目前可采伐的用材树种蓄积比例,且强度越大,减少的越多(图 4)。但低强度择伐林目前可采伐的用材树种蓄积比例与原始林无显著差异,而高强度择伐 T1 和 T2 目前可采伐的用材树种蓄积比例与原始林差异均达到显著水平。原始林中目前可采的红松蓄积为 157.25 m³,占总蓄积比例为 35.36%。低强度择伐使目前可采的红松蓄积增大,高强度择伐使之减小,但择伐后样地目前可采的红松蓄积与原始林差异不显著,而 T1 与 T0 间差异达到显著水平。择伐后目前可采的红松蓄积比例与蓄积变化规律相同。

3 讨论

3.1 择伐对森林结构的影响

择伐是实现森林收获利用的一种手段,不可避免地对森林生态系统产生影响。由于择伐作业过程会破坏林内环境和幼树^[17-19],且不同择伐强度作业林内环境破坏程度不同,进而引起林地光照、温度和湿度等因子不同,故对林分结构产生不同的影响^[20]。低强度择伐能改善林内阴暗、潮湿的小环境,增加透光度,减缓了保留木之间对资源和环境的竞争,调整林木的组成和结构,从而促进林下植被的恢复和生长。择伐强度越大,对林内环境和幼树的破坏程度越大^[21-22],森林结构所受的影响也越大。本研究中低强度择伐后的林分基本上能保持原有的物种组成,与邱仁辉^[9]等人的研究结果一致,有利于原有物种的保持和恢复,这对于珍惜树种的择伐利用具有重要意义。而高强度择伐由于移出大径级的树木较多,并对保留木产生砸倒、折顶和砸掉树枝等损伤,故物种组成和蓄积结构发生明显的变化。因此,从科学经营阔叶红松林的角度出发,应尽量采取低强度择伐,同时在择伐时应应对择伐作业进行合理的规划,因为没有规划的择伐作业对林地保留木的损伤有很大影响^[23]。

3.2 择伐对木材生产量的影响

本研究中经过择伐处理的林分蓄积量低于未择伐处理的林分^[2,6],但低强度择伐的林分蓄积量与未择伐林分蓄积量没有显著差异。主要是由于低强度择伐林分中保留的大径级林木的数量较多,采伐前后林分蓄积量的变化不大。而高强度择伐后林分中减少了很多大径级林木,并在择伐作业过程中对样地保留木的破坏程度也较大,故林分蓄积量的变化较大,显著低于原始林^[24]。

择伐对红松(包括红松株数和蓄积,以及 DBH≥40 cm 的红松株数和蓄积)的影响不显著,而对用材树种的影响较大,主要与该局的采伐方案有关。自 2000 年以后,该林业局将红松列为保护树种,不进行采伐,而主要采伐蒙古栎、水曲柳、春榆和紫椴。样地中红松的变化主要是由自然稀疏以及采伐作业过程对其造成的损伤引起,所以择伐后样地中红松株数和蓄积与原始林没有显著差异。而择伐后样地中用材树种的变化则主要是采伐引起的,且采伐强度越大,其减少量越多,进而导致高强度择伐后样地中目前可采伐的木材量非常少。根据森林采伐技术规程,蓄积择伐强度不超过 40%,商品林择伐强度一般在 20%—40%。但由于采伐操作过程很难控制,故实际采伐强度往往超过预期的采伐强度。按目前森林经营方案,只采伐满足要求的用材树种,以森林采伐规程中商品林采伐强度的最低标准 20%,对择伐后的样地进行采伐,只有低强度择伐样地满足要求,且伐后样地中可采的木材量几乎为 0。如果考虑对满足采伐要求的红松与用材树种共同进行采伐,那么不仅样地中可采伐的木材量较大,也能改善林分的蓄积结构。因此,从阔叶红松林木材可持续利用角度来看,需要重新思考红松不作为采伐树种后的用材林经营技术模式。由于本研究只考虑到择伐强度一个因素,并未与择伐周期相结合。故应深入研究二者结合后,对森林木材可持续利用的影响。

4 结论

(1) 低强度择伐对物种组成和蓄积结构没有显著影响,而高强度择伐使阔叶红松林物种组成和蓄积结构发生较大的改变。

(2) 择伐后林分蓄积量均显著小于未择伐处理的林分蓄积量,但低强度择伐与高强度择伐处理间没有显

著差异。

(3) 择伐显著减少用材树种株数和蓄积,尤其是对目前可采的用材树种株数和蓄积影响最为显著,而对红松没有显著影响。

(4) 在目前的经营方式下,择伐后的样地中可采伐的木材量非常少。为了使木材可持续利用角度,应重新考虑是否对红松进行采伐。

参考文献 (References):

- [1] Kuuluvainen T. Natural variability of forests as a reference for restoring and managing biological diversity in boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2002, 36: 97-125.
- [2] Buffum B, Gratzner G, Tenzin Y. The sustainability of selection cutting in a late successional broadleaved community forest in Bhutan. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(12): 2084-2091.
- [3] Puettmann K J, Coates K D, Messier C. *A Critique of Silviculture: Managing for Complexity*. Washington, D C; Island Press, 2008.
- [4] Franklin J F, Spies T A, Van Pelt R, Carey A B, Thornburgh D A, Berg D R, Lindenmayer D B, Harmon M E, Keeton W S, Shaw D C, Bible K, Chen J Q. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1/3): 399-423.
- [5] Matsuda K, Shibuya M, Koike T. Maintenance and rehabilitation of the mixed conifer-broadleaf forests in Hokkaido, northern Japan. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2002, 5(2): 119-130.
- [6] 胡云云, 闵志强, 高延, 冯启祥. 择伐对天然云冷杉林林分生长和结构的影响. *林业科学*, 2011, 47(2): 17-24.
- [7] Clark D A, Clark D B. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. *Ecological Applications*, 1999, 9(3): 981-997.
- [8] Archambault L, Delisle C, Larocque G R. Forest regeneration 50 years following partial cutting in mixed wood ecosystems of southern Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 703-711.
- [9] 邱仁辉, 陈涵. 择伐作业对常绿阔叶林乔木层树种结构及物种多样性的影响. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 158-161.
- [10] Bergstedt J, Hagner M, Milberg P. Effects on vegetation composition of a modified forest harvesting and propagation method compared with clear-cutting, scarification and planting. *Applied Vegetation Science*, 2008, 11(2): 159-168.
- [11] 金永焕, 李敦求, 姜好相, 刘军, 李光华. 择伐干扰后长白山山区天然次生林物种多样性的变化. *吉林农业大学学报*, 2006, 28(1): 35-39.
- [12] Lobo J, Barrantes G, Castillo M, Quesada R, Maldonado T, Fuchs E J, Solís S, Quesada M. Effects of selective logging on the abundance, regeneration and short-term survival of *Caryocar costaricense* (Caryocaraceae) and *Peltogyne purpurea* (Caesalpinaceae), two endemic timber species of southern Central America. *Forest Ecology and Management*, 2007, 245(1/3): 88-95.
- [13] 齐麟, 于大炮, 周旺明, 周莉, 赵福安, 王长海, 代力民. 采伐对长白山阔叶红松林生态系统碳密度的影响. *生态学报*, 2013, 33(10): 3065-3073.
- [14] Dai L M, Shao G F, Chen G, Liu X S, Guan Z P, Li Y. Forest cutting and regeneration methodology on Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14(1): 56-60.
- [15] 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. *生态学报*, 2010, 30(21): 5843-5852.
- [16] 刘琦, 蔡慧颖, 金光泽. 择伐对阔叶红松林碳密度和净初级生产力的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2709-2716.
- [17] Nyland R D. Diameter-limit cutting and silviculture in Northern Hardwoods // Kenefic L S, Nyland R D, eds. *Proceedings of the Conference on Diameterlimit Cutting in Northeastern Forests*. Northeastern Research Station. U. S. Amherst, MA; Forest Service, 2006: 16-23.
- [18] Miya H, Yoshida T, Noguchi M, Nakamura F. Individual growing conditions that affect diameter increment of tree saplings after selection harvesting in a mixed forest in northern Japan. *Journal of Forest Research*, 2009, 14(5): 302-310.
- [19] Briedis J I, Wilson J S, Benjamin J G, Wagner R G. Biomass retention following whole-tree, energy wood harvests in central Maine: adherence to five state guidelines. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(8): 3552-3560.
- [20] 郑丽凤, 周新年. 择伐强度对天然林树种组成及物种多样性影响动态. *山地学报*, 2008, 26(6): 699-706.
- [21] Crome F H J, Moore L A, Richards G C. A study of logging damage in upland rainforest in north Queensland. *Forest Ecology and Management*, 1992, 49(1/2): 1-29.
- [22] 邱仁辉, 周新年. 不同强度的择伐作业对保留木与幼树幼苗的影响. *森林工程*, 1997, 13(3): 5-7.
- [23] Johns J S, Barreto P, Uhl C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, 1996, 89(1/3): 59-77.
- [24] 王飞, 代力民, 邵国凡, 谷会岩, 惠淑荣, 熊晓波, 王惠. 非线性状态方程模拟异龄林径阶动态-以长白山阔叶红松林为例. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 101-105.