

DOI: 10.5846/stxb201405301112

吴志军, 苏东凯, 牛丽君, 于大炮, 周旺明, 周莉, 吴胜男, 代力民. 阔叶红松林森林资源可持续利用方案. 生态学报, 2015, 35(1): 0024-0030.

Wu Z J, Su D K, Niu L J, Yu D P, Zhou W M, Zhou L, Wu S N, Dai L M. Evaluation of a sustainable forest utilization program for broadleaved Korean pine mixed forests in the Changbai Mountain region of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 0024-0030.

阔叶红松林森林资源可持续利用方案

吴志军^{1,2}, 苏东凯³, 牛丽君⁴, 于大炮¹, 周旺明¹, 周莉¹, 吴胜男¹, 代力民^{1,*}

1 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 辽宁工程技术大学, 阜新 123000

3 吉林森林工业集团有限责任公司, 长春 130021

4 吉林省长白山科学研究院, 吉林省长白山保护开发区 133613

摘要: 天保工程实施后, 为了促进次生林向原始阔叶红松林恢复, 不采红松只采伐阔叶树种的经营方式在长白山地区被广泛应用, 部分林区陷入可采伐资源匮乏的困境。为了探究阔叶红松林森林资源可持续利用方案, 针对红松(蓄积)比例不同的阔叶红松林次生林, 利用林木材积生长方程与保留系数模型, 模拟了预设经营方案下林分总蓄积量与可采蓄积量动态变化。研究表明, 在禁止采伐红松的经营方式下, 红松(蓄积)比例较高的次生林将无法达到森林资源可持续利用的目标, 次生林的经营方案需要根据林分中红松(蓄积)比例不同而区别制定; 对于红松蓄积低于 40% 的次生林, 推荐不采伐红松、20% 采伐强度、40a 周期的经营方案; 对于红松蓄积高于 40% 的次生林, 推荐可以采伐红松、20% 采伐强度、30a 周期的经营方案。另外, 可采蓄积量的恢复期比总蓄积量的恢复期更长, 以可采蓄积恢复期作为评价指标, 确定采伐周期, 更有利于森林资源的可持续利用。

关键词: 阔叶红松林; 树种组成; 蓄积量; 预测模型; 采伐方案

Evaluation of a sustainable forest utilization program for broadleaved Korean pine mixed forests in the Changbai Mountain region of Northeast China

WU Zhijun^{1,2}, SU Dongkai³, NIU Lijun⁴, YU Dapao¹, ZHOU Wangming¹, ZHOU Li¹, WU Shengnan¹, DAI Limin^{1,*}

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

3 Jilin Forest Industry Group Limited Liability Company, Changchun 130021, China

4 Changbai Mountain Academy of Sciences, Changbai Mountain Protection and Development Zone, Jilin Province 133613, China

Abstract: China's Natural Forest Conservation Program was launched in 1998. Since then, a harvesting model based on logging broadleaved species while retaining *Pinus koraiensis* has been widely applied in the Changbai Mountain region of Northeast China. The primary goal of this model is to promote the return of degraded secondary forests to primary broadleaved Korean pine mixed forests (BKF's). However, because of differences in tree species composition among secondary forests, this harvest model has led to a decrease in timber resources in some parts of the region. In order to explore a sustainable utilization program for BKF's, we simulated the dynamics of total timber stocks under different harvest scenarios. We selected five secondary 1-hm² BKF plots, which had been established in 2007 in the area administered by the Lushuihe Forestry Bureau. In these plots, *Pinus koraiensis* accounted for approximately 20%, 30%, 40%, 50%, or 60% of the gross volume. We divided each plot into 25 subplots, each measuring 20 m×20 m. Within these plots, we identified and

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD22B04)

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-11-05

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

measured all free-standing trees with a diameter at breast height of ≥ 2 cm at 1.3 m above the ground. To simulate volume dynamics in the plots, we divided the tree species into three groups, namely, conifer trees, commercial broadleaved trees, and other trees. For each group, we applied volume growth equations and survival index equations to predict the volume dynamics of stands. In addition, we tested the validity of the harvesting model by using paired *t*-tests to analyze data obtained over a 10-year period from 10 permanent plots, ranging in area from 0.25 hm^2 to 0.5 hm^2 . We calculated the gross volumes and the volumes available for harvesting of stands under a range of management programs, with harvest intensities of 20%, 30%, or 40% and cutting cycles of 10 years, 20 years, 30 years, or 40 years. In addition, we divided the programs into two groups: in the first group, harvesting of *Pinus koraiensis* was permitted, whereas in the second group, harvesting of *Pinus koraiensis* was prohibited. We verified the validity of the harvesting model ($t=0.229$, $P=0.829$). The logging schemes that prohibited harvesting of *Pinus koraiensis* not only restricted the volume of available timber but also made restoration more difficult. Even under the lowest harvest intensity of 20%, the available timber volumes did not return to original levels after 40 years of restoration in secondary forests, where *Pinus koraiensis* comprised $>40\%$ of the total volume. Hence, to achieve sustainable utilization in secondary forests, the characteristics of tree composition should be considered when developing harvest schemes. For secondary forests in which *Pinus koraiensis* comprises $>40\%$ of the total volume, the harvest scheme should permit harvesting of *Pinus koraiensis* with a cutting intensity of 20% at 30-year intervals. In contrast, for secondary forests in which *Pinus koraiensis* comprises $<40\%$ of the total volume, the harvest scheme should prohibit harvesting of this species, with a cutting intensity of 20% at 40-year intervals. We further showed that the period required for restoring the volume available for harvesting was longer than the period required for restoring the gross volume. Hence, evaluation of the logging cycle according to the period required for restoring the volume available for harvest will more efficiently promote sustainable forest utilization.

Key Words: broadleaf Korean pine mixed forest; tree composition; volume; prediction model; logging scheme

采伐是森林资源利用的主要手段^[1],会直接或间接影响森林蓄积生长量、组成结构以及森林更新^[2-4],因此,制定科学合理的采伐方案对森林资源的可持续利用具有重要意义。

长白山阔叶红松林分布区是我国重要的木材供应基地。经过多年的过度采伐,原始阔叶红松林几乎消耗殆尽,形成大面积的次生林^[5]。天保工程实施后,为了促进次生林向原始阔叶红松林恢复,不采红松只采阔叶树种(水曲柳、椴树、榆树、蒙古栎)的采伐方式在长白山阔叶红松林区被广泛应用,部分林区陷入可采资源匮乏的困境。

为了实现阔叶红松林可持续经营的目标,基于不同的原理和方法,学者们从采伐径级、采伐强度、采伐周期等方面对阔叶红松林的经营方案开展了相关研究^[6-8]。但是,这些研究并未考虑林分树种组成差异对制定经营方案的影响。由于次生林之间树种组成差别很大^[5,9-10],相同的经营方案在不同次生林之间会产生不同的经营效果。针对阔叶红松林次生林的树种组成特征区别制定经营方案,成为制约阔叶红松林可持续经营的关键问题。此外,当前的研究是以林分总蓄积量完全恢复为前提条件,确定采伐周期的^[6-8,11],这是否会导致可采伐的大径级立木的蓄积量(可采蓄积量)越采越少,也是一个需要关注的重要问题。

因此,本文以阔叶红松林森林资源可持续利用为研究目标,探讨下列问题:(1)如何根据次生林树种组成差异,区别制定经营方案?(2)总蓄积量恢复期与可采蓄积量恢复期是否有差异?确定采伐周期时,哪一个更合理的评价指标?

1 研究区概况

研究区位于吉林森工集团露水河林业局(127°29'—128°02'E,42°24'—42°49'N)。该地区地处长白山西北部台地边缘,属于寒温带大陆性气候,全局平均海拔为 600—800 m,年平均气温 1.5℃,年降水量 800—

1040 mm,常年主导风向为西风,冬夏风向更替明显。土壤成土母质主要为花岗岩、玄武岩、少部分为沉积岩,土壤主要亚类有白浆暗棕壤,典型暗棕壤和暗色暗棕壤。主要植被类型为阔叶红松林,立木层中除优势树种红松(*Pinus koraiensis*)外,还伴有椴树(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、春榆(*Ulmus japonica*)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等^[12]。

2 研究方法

2.1 样地与数据

根据林分中红松(蓄积)比例不同,2007年夏季(7—8月)在露水河林业局选择5块阔叶红松林次生林地块,分别设置了1hm²固定样地进行调查(表1)。利用全站仪将各样地划分成25个20m×20m的样方,对各样方内胸径≥2cm的乔木进行每木检尺,并记录各乔木的树种名和胸径,数据用于经营方案模拟。

森林生长预测模型的验证数据来源于该区域10块固定样地的复测资料。固定样地面积为0.25—0.5hm²,复测间隔期为10a。

表1 样地概况

Table 1 General information of study sites

| 样地编号 Plot ID | 总蓄积量/(m ³ /hm ²) Gross volume | 树种组成 Trees composition |
|-----------------|---|---------------------------|
| P1 | 194.50 | 2红2色1椴1柞1水1榆1胡1杂 |
| P2 | 199.66 | 3红2色1椴1榆1水1胡1杂 |
| P3 | 184.82 | 4红2榆1椴1水1色1杂 |
| P4 | 346.69 | 5红1椴1色1柞1水1榆 |
| P5 | 375.49 | 6红2椴1榆1色 |

红:红松,椴:椴树,水:水曲柳,柞:蒙古栎,榆:榆树,胡:胡桃楸,杂:其他树种

2.2 森林生长预测

在林分生长过程中,林分蓄积的增长量取决于活立木逐年生长与部分树木自然死亡的共同作用^[13]。王战等在长白山西坡松江河林业局,针对阔叶红松林择伐林,建立了主要树种的生长与枯损模型^[14]。本次研究区与松江河林业局相毗邻,同属于长白山西坡区域,且研究的对象同为阔叶红松林择伐林。因此,本文采用王战等建立的森林生长预测模型对林分蓄积动态进行模拟^[14]。

2.2.1 林木生长预测

本文采用传统的材积生长曲线法模拟林木生长^[14-16]。林木被划分为3个树种组:针叶(红松、冷杉、云杉)、阔叶用材树种(椴树、水曲柳、蒙古栎、榆树)、色木与杂木(色木与其他阔叶树种)。它们的材积生长方程,分别采用王战等建立的红松、椴树、色木的材积生长曲线^[14]:

$$V_{\text{针叶}} = 0.1 - 0.0094t + 0.000255t^2 - 0.00000036t^3 \quad (1)$$

$$V_{\text{阔叶用材}} = 0.27 - 0.0127t + 0.000195t^2 - 0.00000028t^3 \quad (2)$$

$$V_{\text{色杂}} = 0.02 - 0.002t + 0.000068t^2 - 0.00000015t^3 \quad (3)$$

式中, $V_{\text{针叶}}$ 为红松、云杉、冷杉材积(m³); $V_{\text{阔叶用材}}$ 为椴树、水曲柳、蒙古栎、榆树材积(m³); $V_{\text{色杂}}$ 为色木与其他树种材积(m³); t 为树木年龄(a)。

根据样地调查得到的树种与胸径数据,利用《吉林省一元立木材积表》中的材积公式,计算出被调查立木的材积。将计算得到的立木材积带入到材积生长方程,求解并取整,既得立木在调查时的年龄。

2.2.2 自然枯损预测

森林在生长过程中,总是伴随着林木的自然稀疏^[17]。林木随着时间逐渐稀疏而保存下来的数量比率为林木的保留系数^[14]。保留系数的大小能够反映林木自然枯损的快慢,本研究中用林木的保留系数代表立木在预测年的存活概率,估算立木材积的保留值。针叶、阔叶用材树种、色木与杂木树种组分别采用王战等建立

的红松、椴树、色木的保留系数^[14]:

$$H_{\text{针叶}} = \frac{11826 - 4261\lg(t)}{11826 - 4261\lg(t_0)} \quad (4)$$

$$H_{\text{阔叶用材}} = \frac{15554 - 6588\lg(t)}{15554 - 6588\lg(t_0)} \quad (5)$$

$$H_{\text{色杂}} = \frac{13626 - 5384\lg(t)}{13626 - 5384\lg(t_0)} \quad (6)$$

式中, $H_{\text{针叶}}$ 为红松、云杉、冷杉的保留系数, $H_{\text{阔叶用材}}$ 为椴树、水曲柳、蒙古栎、榆树保留系数, $H_{\text{色杂}}$ 为色木与其他阔叶树种保留系数, t 为采伐后若干年林木年龄(a), t_0 为采伐时林木年龄(a)。

2.2.3 森林生长模型的检验

为了验证森林生长模型的有效性,对研究区内 10 块固定样地(面积为 0.25—0.5hm²,生长间隔期为 10a)蓄积量的预测值和实际值进行配对 t 检验,采用 SPSS 19.0 进行统计分析。

2.3 采伐模拟与方案评价

本次研究考虑了目标树种、采伐强度、采伐周期 3 个因素,共预设了 24 个经营预案。其中:采伐强度(蓄积)分别为 20%、30%、40%;采伐周期分别为 10、20、30、40a;目标树种分为不采红松和可以采伐红松两种情况。可采伐立木的最小胸径为 40cm,可采伐的阔叶树种为椴树、水曲柳、榆树、蒙古栎。

利用各主要树种组的材积生长方程,预测现有立木在采伐期末的材积,该值与保留系数的乘积,作为采伐期末保留下来的材积。根据保留下来的立木材积,分别统计采伐期末,林分的总蓄积量与可采伐蓄积量。若林分的总蓄积量与可采蓄积量在一个采伐周期内均能恢复到采伐前水平,则认为该方案能够满足森林资源可持续利用的要求。

3 结果与分析

3.1 森林生长模型检验

经过计算,10 个固定样地蓄积量预测值与实际值配对 t 检验的 t 值为 0.229, $t < t_{0.05}(9) = 2.262$; P 值为 0.824, $P > 0.05$ 。预测结果与实测结果无显著差异,森林生长模型是有效的。

3.2 经营方案模拟结果

3.2.1 方案一:不采伐红松

(1) 总蓄积量

在 20%采伐强度下,P1、P2、P3 总蓄积量在 20a 内完全恢复到采伐前水平,P4、P5 总蓄积在 30a 内完全恢复;在 30%采伐强度下,P2、P3 总蓄积在 30a 内能完全恢复到采伐前水平,P4 总蓄积在 40a 内恢复,P1 与 P5 可采伐资源量不能满足采伐要求;所有样地的可采蓄积都无法满足 40%强度采伐的要求(表 2)。

表 2 不采伐红松的经营方案模拟结果

Table 2 Simulating results of prohibiting harvest Korean pine

| 样地编号 Plot ID | 恢复时间 Restoration time / a | 20c%采伐强度 20% harvesting intensity | | | 30%采伐强度 30% harvesting intensity | | | 40%采伐强度 40% harvesting intensity | | |
|-----------------|---------------------------------|--|---|--------------|--|---|--------------|--|---|--------------|
| | | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% |
| | | | | | | | | | | |
| P1 | 0 | 194.50 | 40.58 | 20.86 | — | — | — | — | — | — |
| | 10 | 185.85 | 16.60 | 8.93 | — | — | — | — | — | — |
| | 20 | 207.85 | 25.72 | 12.37 | — | — | — | — | — | — |
| | 30 | 230.24 | 34.59 | 15.02 | — | — | — | — | — | — |
| | 40 | 252.72 | 66.06 | 26.14 | — | — | — | — | — | — |
| | 0 | 199.66 | 36.02 | 18.04 | 199.66 | 36.02 | 18.04 | — | — | — |
| | 10 | 183.72 | 22.16 | 12.06 | 160.39 | 6.01 | 3.75 | — | — | — |

续表

| 样地编号 Plot ID | 恢复时间 Restoration time /a | 20c%采伐强度 20% harvesting intensity | | | 30%采伐强度 30% harvesting intensity | | | 40%采伐强度 40% harvesting intensity | | |
|-----------------|-----------------------------|--|---|--------------|--|---|--------------|--|---|--------------|
| | | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% |
| P2 | 20 | 215.09 | 29.83 | 13.87 | 190.07 | 11.98 | 6.30 | — | — | — |
| | 30 | 248.60 | 37.36 | 15.03 | 221.8 | 17.74 | 8.00 | — | — | — |
| | 40 | 282.52 | 44.03 | 15.58 | 253.87 | 22.55 | 8.88 | — | — | — |
| | 0 | 184.82 | 39.78 | 21.52 | 184.82 | 39.78 | 21.52 | — | — | — |
| | 10 | 167.57 | 15.35 | 9.16 | 149.04 | 3.79 | 2.54 | — | — | — |
| P3 | 20 | 188.99 | 22.55 | 11.93 | 169.21 | 9.74 | 5.76 | — | — | — |
| | 30 | 211.13 | 32.29 | 15.29 | 190.01 | 18.15 | 9.55 | — | — | — |
| | 40 | 234.66 | 43.99 | 18.75 | 211.29 | 27.58 | 13.05 | — | — | — |
| | 0 | 346.69 | 114.25 | 32.95 | 346.69 | 114.25 | 32.95 | — | — | — |
| | 10 | 313.19 | 56.87 | 18.16 | 272.25 | 17.06 | 6.27 | — | — | — |
| P4 | 20 | 342.73 | 68.52 | 19.99 | 298.01 | 24.93 | 8.37 | — | — | — |
| | 30 | 373.01 | 79.30 | 21.26 | 324.23 | 31.65 | 9.76 | — | — | — |
| | 40 | 403.04 | 94.3 | 23.40 | 349.92 | 42.3 | 12.09 | — | — | — |
| | 0 | 375.49 | 86.83 | 23.12 | — | — | — | — | — | — |
| | 10 | 332.41 | 16.04 | 4.83 | — | — | — | — | — | — |
| P5 | 20 | 360.19 | 17.41 | 4.83 | — | — | — | — | — | — |
| | 30 | 387.93 | 23.4 | 6.03 | — | — | — | — | — | — |
| | 40 | 414.31 | 24.99 | 6.03 | — | — | — | — | — | — |

—: 林分中可采蓄积量不能满足采伐要求; 可采蓄积比例 = 可采蓄 / 总蓄积 × 100% ; 总蓄积 Gross volume; 可采蓄积 Available volume; 可采蓄积比例 Percentage of available volume

(2) 可采蓄积量

在 20%采伐强度下, P1、P2、P3 可采蓄积量分别在 40、30、40a 内完全恢复到采伐前水平, P4、P5 可采蓄积在 40a 内无法完全恢复; 30%采伐强度下, P2、P3、P4 的可采伐蓄积都无法在 40a 内恢复到采伐前水平(表 2)。

3.2.2 方案二: 采伐红松

(1) 总蓄积量

在 20%采伐强度下, P1、P2、P3、P4 总蓄积量在 20a 内完全恢复到伐前水平, P5 总蓄积在 30a 内完全恢复; 30%采伐强度下, P1、P2、P3、P4 总蓄积量在 30a 内完全恢复到伐前水平, P5 总蓄积在 40a 内完全恢复; 40%采伐强度下, P1、P2 总蓄积分别在 40 年与 30a 内完全恢复到伐前水平, P3、P4、P5 可采蓄积则无法在 40a 内完全恢复(表 3)。

表 3 可以采伐红松的经营方案模拟结果

Table 3 Simulating results of permitting to harvest Korean pine

| 样地编号 Plot ID | 恢复时间 Restoration time /a | 20c%采伐强度 20% harvesting intensity | | | 30%采伐强度 30% harvesting intensity | | | 40%采伐强度 40% harvesting intensity | | |
|-----------------|-----------------------------|--|---|--------------|--|---|--------------|--|---|--------------|
| | | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% |
| P1 | 0 | 194.50 | 88.95 | 45.73 | 194.50 | 88.95 | 45.73 | 194.50 | 88.95 | 45.73 |
| | 10 | 182.75 | 56.86 | 31.11 | 161.78 | 35.89 | 22.18 | 140.28 | 14.38 | 10.25 |
| | 20 | 205.76 | 72.28 | 35.13 | 183.17 | 49.69 | 27.13 | 158.8 | 25.32 | 15.94 |
| | 30 | 228.58 | 85.79 | 37.53 | 204.37 | 61.58 | 30.13 | 177.86 | 35.07 | 19.72 |
| | 40 | 252.51 | 121.91 | 48.28 | 226.7 | 96.09 | 42.39 | 197.17 | 66.57 | 33.76 |
| P2 | 0 | 199.66 | 117.00 | 58.60 | 199.66 | 117.00 | 58.60 | 199.66 | 117.00 | 58.60 |
| | 10 | 188.22 | 89.86 | 47.74 | 166.86 | 68.50 | 41.05 | 145.74 | 47.38 | 32.51 |
| | 20 | 223.58 | 113.89 | 50.94 | 198.62 | 90.93 | 45.78 | 178.35 | 68.66 | 38.50 |
| | 30 | 261.79 | 138.84 | 53.03 | 237.19 | 114.24 | 48.16 | 213.80 | 90.85 | 42.49 |
| | 40 | 300.96 | 163.1 | 54.19 | 274.69 | 136.82 | 49.81 | 250.21 | 112.34 | 44.90 |

续表

| 样地编号 Plot ID | 恢复时间 Restoration time / a | 20%采伐强度 20% harvesting intensity | | | 30%采伐强度 30% harvesting intensity | | | 40%采伐强度 40% harvesting intensity | | |
|-----------------|---------------------------------|--|---|--------------|--|---|--------------|--|---|--------------|
| | | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% | 总蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积/ (m ³ /hm ²) | 可采蓄积 比例/% |
| P3 | 0 | 184.82 | 108.38 | 58.64 | 184.82 | 108.38 | 58.64 | 184.82 | 108.38 | 58.64 |
| | 10 | 168.69 | 90.38 | 53.58 | 147.17 | 68.86 | 46.79 | 125.09 | 46.79 | 37.41 |
| | 20 | 190.87 | 108.85 | 57.03 | 167.41 | 85.39 | 51.01 | 143.13 | 61.12 | 42.70 |
| | 30 | 214.86 | 129.89 | 60.45 | 189.45 | 104.48 | 55.15 | 162.14 | 77.17 | 47.59 |
| | 40 | 239.80 | 154.27 | 64.33 | 212.44 | 126.91 | 59.74 | 182.82 | 97.29 | 53.22 |
| P4 | 0 | 346.69 | 270.55 | 78.04 | 346.69 | 270.55 | 78.04 | 346.69 | 270.55 | 78.04 |
| | 10 | 326.22 | 242.72 | 74.40 | 282.55 | 199.04 | 70.44 | 243.58 | 160.07 | 65.72 |
| | 20 | 360.46 | 275.15 | 76.33 | 314.71 | 229.4 | 72.89 | 272.70 | 187.38 | 68.71 |
| | 30 | 396.07 | 309.42 | 78.12 | 348.36 | 261.71 | 75.13 | 303.24 | 216.58 | 71.42 |
| P5 | 0 | 432.09 | 344.7 | 79.78 | 382.52 | 295.13 | 77.15 | 334.23 | 246.84 | 73.85 |
| | 10 | 375.49 | 326.96 | 87.08 | 375.49 | 326.96 | 87.08 | 375.49 | 326.96 | 87.08 |
| | 20 | 335.15 | 281.52 | 84.00 | 288.18 | 234.56 | 81.39 | 245.15 | 191.52 | 78.12 |
| | 30 | 366.33 | 307.12 | 83.84 | 317.79 | 258.58 | 81.37 | 272.74 | 213.53 | 78.29 |
| | 30 | 397.68 | 340.65 | 85.66 | 347.77 | 290.74 | 83.60 | 300.90 | 243.86 | 81.04 |
| | 40 | 427.87 | 377.05 | 88.12 | 376.81 | 327.99 | 87.04 | 328.30 | 277.48 | 84.52 |

(2) 可采蓄积量

在 20%采伐强度下, P1 可采蓄积量在 40a 内完全恢复到采伐前水平, P2、P5 可采蓄积在 30a 内完全恢复, P3、P4 可采蓄积在 20a 内完全恢复; 30%采伐强度下, 所有样地可采蓄积都在 40a 内完全恢复到采伐前水平; 40%采伐强度下, 所有样地可采蓄积都无法在 40a 内完全恢复(表 3)。

4 讨论

4.1 经营方案筛选

对于红松(蓄积)比例高于 40%的次生林(P4、P5), 如果禁止采伐红松, 即使是在最低的 20%采伐强度下, 经过 40a 的恢复, 可采伐资源仍无法恢复到采伐前水平(表 2)。为了实现森林资源的可持续利用, 这些林分中的红松也要作为可以采伐的树种。可以采伐红松, 20%采伐强度、30a 周期与 30%采伐强度、40a 周期这两个方案, 都能满足林分总蓄积与可采蓄积完全恢复的要求(表 3)。由于低强度采伐更有利于保持森林组成结构的稳定^[18-19], 并且, 低强度采伐林分的恢复期更短, 更有利于未来经营活动的调整^[20], 对红松(蓄积)比例超过 40%的次生林, 可以采伐红松、采伐强度为 20%、周期为 30a 的方案更优。

对红松(蓄积)比例低于 40%的次生林(P1、P2、P3), 在允许采伐红松、30%采伐强度、40a 周期的方案中, 各林分的总蓄积与可采伐蓄积都能完全恢复(表 3); 如果禁止采伐红松, 则在 20%采伐强度、40a 周期的方案中, 各林分的总蓄积与可采伐蓄积能够完全恢复(表 2)。虽然模拟结果显示, 可以采伐红松的方案能够生产更多的木材, 但是这样的采伐方式会降低红松在林分中的地位, 减少红松种源。由于充足的红松种源是次生林恢复到原始阔叶红松林的必要条件^[9, 21], 可以采伐红松的方案将不利于这些次生林向原始阔叶红松林演替。此外, 该区域原始阔叶红松林的蓄积量可达 400m³/hm²左右^[5], P1、P2、P3 的蓄积量远远小于这一数值, 说明这些林分远未恢复到原始林水平。降低采伐强度, 延长采伐周期更有利于这些次生林森林资源的恢复。所以, 对红松(蓄积)比例低于 40%的次生林, 禁止采伐红松、20%采伐强度、40a 采伐周期的方案更适合。

4.2 可采蓄积量恢复对采伐周期的影响

采伐方案模拟结果显示, 在总蓄积量完全恢复之前, 林分可采蓄积比例持续低于采伐前的数值(表 2, 表 3)。这表明, 即使林分总蓄积量完全恢复到采伐前水平, 林分的可采蓄积量也无法完全恢复。

这是因为采伐干扰在移除大树的同时, 导致冠层疏开, 改善了林下的光、热条件^[22-23], 促进了幼苗更新及小树生长^[9], 林分中幼树与小树的数量与蓄积量会显著增加^[24-25]。由于林分中小树和幼树的蓄积量高于采

伐前的数值,即使林分总蓄积恢复到采伐前水平,可采伐的大树的蓄积量也不能完全恢复。以总蓄积量恢复为前提条件,制定采伐周期,会导致可采伐资源越来越少。因此,为了实现森林资源的可持续利用,需要以可采伐蓄积的恢复为限制条件,确定采伐周期。

本次研究模拟了一个择伐周期内森林资源的动态。如果模拟森林经营的长期效果,需要进一步考虑森林更新的影响,经营方案的情景模拟也将更加复杂。此外,在森林经营方案筛选的过程中,经营活动的社会效益、经济效益等也是需要考虑的重要因素,在以后的研究中有待进一步探讨。

5 结论

(1)禁止采伐红松的经营方式,减少了可采伐资源的数量,增加了被采伐的阔叶树种的恢复难度。这种经营方式会导致红松(蓄积)比例较高的次生林,森林资源无法被持续利用。

(2)阔叶红松林次生林的经营方案需要根据林分树种组成不同而区别制定:若红松蓄积高于40%,可以采伐红松,20%采伐强度、30a周期的经营方案较优;若红松蓄积低于40%,不采伐红松,20%采伐强度、40a周期的方案较优。

(3)相同采伐方式下,林分可采蓄积量的恢复期要大于总蓄积量的恢复期。为了实现森林资源的可持续利用,应该以可采伐蓄积恢复期为评价指标,制定采伐周期。

参考文献 (References):

- [1] 唐守正. 东北天然林生态采伐更新技术指南. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 1-2.
- [2] 徐振邦, 代力民, 陈吉泉, 王战, 戴洪才, 李昕. 长白山红松阔叶混交林森林天然更新条件的研究. 生态学报, 2001, 21(9): 1413-1420.
- [3] 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.
- [4] Yu D P, Zhou L, Zhou W M, Ding H, Wang Q W, Wang Y, Wu X Q, Dai L M. Forest management in northeast China: history, problems, and challenges. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1122-1135.
- [5] 代力民, 谷会岩, 邵国凡, 王庆礼. 中国长白山阔叶红松林. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2004: 16-17, 53-54.
- [6] 于振良, 于贵瑞, 赵士洞, Garman S. 长白山阔叶红松林动态及经营管理模型研究. 资源科学, 2001, 23(6): 59-63.
- [7] 王飞, 邵国凡, 代力民, 惠淑荣. 矩阵模型在森林择伐经营中的应用. 生态学杂志, 2005, 24(6): 681-684.
- [8] Shao G F, Wang F, Dai L M, Bai J W, Li Y S. A density-dependent matrix model and its applications in optimizing harvest schemes. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2006, 49(1S): 108-117.
- [9] 张颂云. 长白山地区次生林演替规律的研究. 森林生态系统研究, 1983, 3: 44-53.
- [10] 张昭臣, 郝占庆, 叶吉, 简菲, 原作强, 邢丁亮, 师帅, 王绪高. 长白山次生杨桦林树木短期死亡动态. 应用生态学报, 2013, 24(2): 303-310.
- [11] 向玮, 雷相东, 洪玲霞, 孙建军, 王培珍. 落叶松云冷杉林矩阵生长模型及多目标经营模拟. 林业科学, 2011, 47(6): 77-87.
- [12] Su D K, Yu D P, Zhou L, Xie X K, Liu Z G, Dai L M. Differences in the structure, species composition and diversity of primary and harvested forests on Changbai Mountain, Northeast China. *Journal of Forest Science*, 2010, 56(6): 285-293.
- [13] 孟宪宇. 测树学(第三版). 北京: 中国林业出版社, 2006: 52-53.
- [14] 王战, 徐振邦, 谭征祥, 戴洪才, 李昕, 郭杏芬. 东北阔叶红松林择伐后林木生长规律的研究. 森林生态系统研究, 1981, 2: 1-22.
- [15] 徐振邦, 戴洪才, 李昕, 谭征祥, 陈传国, 章一平. 阔叶红松林中主要建群树种-红松立木材积的生长特点. 森林生态系统研究, 1983, 3: 271-277.
- [16] 代力民, 孙伟中, 邓红兵, 肖以华. 长白山北坡椴树阔叶红松林群落主要树种的年龄结构研究. 林业科学, 2002, 38(3): 73-77.
- [17] 周永斌, 殷有, 殷鸣放, 张飞. 白石砬子国家级自然保护区天然林的自然稀疏. 生态学报, 2011, 31(21): 6469-6480.
- [18] Hall J S, Harris D J, Medjibe V, Ashton P M S. The effects of selective logging on forest structure and tree species composition in a Central African forest: implications for management of conservation areas. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183(1/3): 249-264.
- [19] McDonald R I, Motzkin G, Foster D R. The effect of logging on vegetation composition in Western Massachusetts. *Forest ecology and management*, 2008, 255(12): 4021-4031.
- [20] Nolet P, Doyon F, Messier C. A new silvicultural approach to the management of uneven-aged Northern hardwoods: frequent low-intensity harvesting. *Forestry*, 2014, 87(1): 39-48.
- [21] Chen X W, Li B L, Lin Z S. The acceleration of succession for the restoration of the mixed-broadleaved Korean pine forests in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3): 503-514.
- [22] Hart J L, Grissino-Mayer H D. Gap-scale disturbance processes in secondary hardwood stands on the Cumberland Plateau, Tennessee, USA // *Forest Ecology*. Netherlands: Springer, 2009: 131-146.
- [23] Promis A, Gärtner S, Reif A, Cruz G. Effects of canopy gaps on forest floor vascular and non-vascular plant species composition and diversity in an uneven-aged *Nothofagus betuloides* forest in Tierra del Fuego, Chile. *Community Ecology*, 2012, 13(2): 145-154.
- [24] Okuda T, Suzuki M, Adachi N, Quah E S, Hussein N A, Manokaran N. Effect of selective logging on canopy and stand structure and tree species composition in a lowland dipterocarp forest in peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175(1/3): 297-320.
- [25] 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.