

DOI: 10.20103/j.stxb.202305151018

岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 赵秀海, 郝珉辉. 阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应. 生态学报, 2024, 44(5): 2019-2028.

Yue Q M, He H J, Zhang C Y, Zhao X H, Hao M H. Responses of tree growth and stand productivity to harvesting disturbance in Korean pine-broadleaved forests. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2019-2028.

阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应

岳庆敏^{1,2}, 何怀江³, 张春雨¹, 赵秀海¹, 郝珉辉^{1,*}

1 北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083

2 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

3 吉林省林业科学研究院, 长春 130013

摘要:提升森林质量、修复生态功能是东北阔叶红松林生态修复的核心,而阐明林木与林分生长对采伐干扰的响应机理是其中的关键。森林对采伐干扰的响应会受到空间尺度、时间尺度以及干扰程度等因素的综合影响。以往的研究侧重于比较不同采伐处理下林木生长的相对大小,而忽视了不同恢复时间下,林木和林分生长随干扰程度的变化。以吉林蛟河阔叶红松林采伐样地为对象,基于连续四次样地调查数据(2011、2013、2015、2018年),分别探讨了林木和林分生长在不同恢复阶段对不同程度采伐干扰的响应,并通过构建分段模型确定采伐干扰阈值。结果显示:林木和林分生长对采伐干扰的响应并不一致,采伐促进了林木生长,并且林木生长量随采伐强度的升高而升高;采伐降低了林分生产力,林分生产力随采伐强度的升高而降低。林木和林分生长对采伐干扰的响应存在时滞效应:林木和林分生长在采伐后两年内并无显著变化,而在采伐三年后才发生明显变化。此外,分段模型的结果显示:当保留木断面面积为 21.6 m²/hm²时,林分生产力最高,表明通过密度调整使阔叶红松林胸高断面面积维持在 21.6 m²/hm²附近,可使林分处于较高的生产力水平、促进森林恢复。研究结果能够为制定科学的阔叶红松林生态修复策略提供技术支撑。

关键词: 阔叶红松林; 采伐干扰; 林木生长; 林分生产力; 采伐强度

Responses of tree growth and stand productivity to harvesting disturbance in Korean pine-broadleaved forests

YUE Qingmin^{1,2}, HE Huaijiang³, ZHANG Chunyu¹, ZHAO Xiuhai¹, HAO Minhui^{1,*}

1 Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

3 Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130013, China

Abstract: Restoring forest quality and ecosystem functions is one of the core goals of sustainable forest management. Elucidating the response mechanism of tree and stand growth to harvesting disturbance can provide important guidance. Previous studies preferred to compare the dissimilarity of tree or stand growth under different harvesting treatments, but ignored the differential response of trees to disturbance intensity under different recovery times. This study was conducted in the Korean pine-broadleaved forests in Jiaohe, Jilin province. Based on the observational data collected in 2011, 2013, 2015, and 2018, we compared the effects of different harvesting intensities and recovery times on tree growth and stand productivity. We evaluated the harvesting threshold of forest productivity using linear and segmental models. The results showed that forest harvesting had significant effects on trees growth and stand productivity. Harvesting promoted tree growth, but reduced stand productivity. Specifically, within two years after harvesting, there was no significant difference in tree and

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(BLX202106); 应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项(ZDJ2022-26)

收稿日期:2023-05-15; **网络出版日期:**2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haomh@bjfu.edu.cn

stand growth, while three years after harvesting, tree growth increased significantly, indicating a time lag effect of forest harvesting. In addition, the results based on the segmental models showed that stand productivity was the highest when the remaining basal area was $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$. Therefore, from the perspective of sustainable management, $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ was the most favorable stand density for forest restoration. The results provide technical guidance for the management and restoration of Korean pine-broadleaved forests.

Key Words: Korean pine-broadleaved forests; harvesting disturbance; tree growth; stand productivity; harvesting intensity

东北森林带是我国“三区四带”生态保护与修复重大工程中唯一的森林带,具有重要的生态战略地位。阔叶红松林是东北森林的典型代表,是自第三纪中新世以来演化形成的与东北地区生态气候最相适应的地带性顶极森林群落^[1-2]。与全球同纬度地区的其他森林相比,阔叶红松林以资源集中、建群种独特、生物多样性高、生态系统功能完善而著称,是我国极为重要和珍贵的森林资源^[3-4]。然而,近百年来由于受到移民开垦、战争破坏以及过度采伐等干扰活动的影响,阔叶红松林资源遭遇破坏严重,形成了大面积以物种组成单一、生态功能退化为特征的次生群落,严重威胁区域生态安全与稳定^[4-6]。提升森林质量、恢复生态功能成为东北地区森林生态修复与可持续经营的核心目标,而阐明林木生长及森林生产力对采伐干扰的响应机制则是其中的关键步骤^[6-7]。

高强度、不合理的采伐干扰通过一次性移除森林中大部分甚至全部林木个体,深刻地改变了森林生物与非生物环境、重塑了森林生态系统过程,是导致全球森林生态功能退化的重要原因^[8-9];而科学的采伐作业则可以在一定程度上优化森林结构、改善林内环境,是促进林木生长、提高森林生态系统功能及其稳定性的重要手段^[10-14]。例如,有研究表明:采伐通过降低林分密度,减少种内、种间竞争,为保留林木创造了更好的生长环境,进而促进了生物多样性和森林生产力^[11-14];采伐同时能够改善林下光照条件、促进森林更新^[15]。因此,科学的采伐作业不仅是获得木材的主要手段,也是森林抚育经营的重要措施。近几十年来,研究者们就采伐干扰对林木生长和林分生产力的影响开展了大量研究,然而由于不同林木对空间和资源的竞争以及对环境变化的反应并不相同,如何通过控制采伐强度、改进采伐措施实现退化森林的结构优化与功能提升一直是相关研究的重点和难点^[14,16]。

林木生长对采伐干扰的响应会受到空间尺度、时间尺度以及采伐强度等因素的影响。从空间尺度来看,林木和林分对采伐的响应并不一致。就个体水平(林木生长)来看,由于减少了个体邻域范围内的竞争压力,采伐对林木生长普遍具有促进作用,并且林木生长量随采伐强度的升高而升高^[17];而从群落水平(林分生产力)来看,采伐的影响则要复杂许多:部分研究指出采伐对林分生长具有显著的促进作用^[18-20],但也有研究指出林分生长与采伐活动无关或负相关^[21-23]。从时间尺度来看,林木生长对采伐的响应会受到恢复时间的显著影响。基于年轮条数据的研究表明,采伐后林木生长可能首先出现短暂的停滞,而后逐年加速,一定时间后生长减缓并逐渐恢复至采伐前的水平^[24-28]。然而,由于缺少对于采伐效应的长期定位监测,目前对采伐后林木生长随恢复时间变化的认识还不够全面,依托长期定位监测数据可为量化林木生长对采伐干扰的响应提供更加直接的证据^[29]。

此外,以往的研究并没有充分考虑采伐强度对林木生长的影响,而侧重于比较不同处理下(如采伐与对照处理)林木及林分的生长差异。然而,由于采伐作业并非均质性的,在轻度采伐(采伐强度 $\leq 20\%$)的样地中,特定个体邻域范围内的林木也有可能被全部移除,因此基于林分水平的采伐强度并不能直接反映邻域范围内采伐干扰的全部信息^[13]。目前邻域范围的采伐干扰是否影响,以及如何影响林木或林分生长尚不清晰,即使是基于连续采伐强度的研究也并未得到统一的结论。部分研究指出采伐强度与林分生产力呈正相关关系^[30];但也有研究指出采伐强度与林分生长呈抛物线关系,并且 $20\%—30\%$ 的采伐强度为最优强度^[31]。如果采伐强度与林分生长之间的抛物线关系成立,那么在连续的采伐强度下,应存在一个采伐阈值,此时采伐对

林分生长的促进作用达到最大。这种基于采伐阈值的思想可以通过构建分段函数进行验证,为确定最优采伐强度提供技术支持,并且已经在量化采伐强度对生物多样性影响的研究中得以应用^[32-34]。因此,应用阈值法探讨采伐干扰对林木和林分生长的影响,对于评价采伐效应、制定可持续的森林经营政策具有重要意义。

本研究基于吉林蛟河阔叶红松林采伐样地,利用采伐前后连续四次样地调查数据(2011年、2013年、2015年和2018年)和三期生长数据(2011—2013年、2013—2015年和2015—2018年),分别从个体和群落水平探讨林木和林分生长对采伐干扰的响应。通过非参数比较,检验采伐干扰是否显著影响林木和林分生长;基于线性回归模型,量化采伐强度与林木和林分生长的关系;基于分段回归模型,探讨影响林木和林分生长的采伐阈值。研究结果旨在揭示阔叶红松林中林木和林分生长对不同采伐强度的响应、确定最优采伐强度,为制定科学、合理的阔叶红松林生态修复与可持续经营策略提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省蛟河林业实验区(地理坐标:43°57'31"—43°58'03"N, 127°44'07"—127°44'40"E)。该地区属于受季风影响的温带大陆性山地气候,年均气温为 3.8℃,年均降水为 696 mm,年均相对湿度为 71%。研究区主要土壤类型为山地暗棕色森林土,土层厚度为 20—100 cm^[14]。研究区植被属于长白植物区系,地带性植被为原始阔叶红松林,但由于长期受到采伐干扰的影响,形成了大面积的次生针阔混交林,而原始阔叶红松林仅存在于某些人为干扰较弱的局部地区^[5]。其主要乔木树种包括:红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、色木槭(*Acer mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等;主要灌木树种包括:暴马丁香(*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*)、簇毛槭(*Acer barbinerve*)、金银忍冬(*Lonicera maackii*)、鼠李(*Rhamnus davurica*)、瘤枝卫矛(*Euonymus verrucosus*)和黄心卫矛(*Euonymus macropterus*)等。

1.2 样地设置

2011年7月,在研究区内选择典型的阔叶红松林建立了四块面积为一公顷(100 m × 100 m)的固定监测样地(表1)。为避免样地本身的差异对结果造成的干扰,尽量选取了地势平坦、林分条件均一、群落结构相似的区域建立样地。四块样地均已完全郁闭,林分年龄为近熟林,以胸高断面面积排序,样地内的主要优势树种为:水曲柳、春榆、色木槭、紫椴和红松。四块样地呈“田”字形分布,相互距离为 100 m。参照热带森林研究中心(CTFS)大面积固定样地的建设标准,将四块样地分别划分为 25 个 20 m × 20 m 的样方,调查并记录样方内所有胸径(DBH) ≥ 1 cm 的木本植物的物种名称、胸径、树高、冠幅和相对位置坐标,并挂牌标记以便进行长期监测^[14]。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the forest plots

样地 Plot	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude /m	坡度 Slope/(°)	胸径 Diameter at Breast Height/cm
1	43°57.984'N	127°43.472'E	453	1	14.60±0.45
2	43°57.963'N	127°43.573'E	443	4	14.90±0.37
3	43°57.908'N	127°43.451'E	430	5	14.25±0.40
4	43°57.878'N	127°43.556'E	497	3	13.93±0.33

2011年12月,经吉林省林业厅批准,对四块样地进行不同强度的采伐作业。采伐开始前,基于样地植被调查数据,按照间密留匀、留优去劣的原则确定保留木和采伐木,同时优先保留林分中的保护树种以及珍稀物种。采伐过程中利用油漆标记采伐木,并记录采伐木牌号,用于确定采伐木断面积和采伐强度。以采伐断面积为依据,四块样地的设计采伐强度为:未采伐(对照),15%轻度采伐,30%中度采伐和 50%重度采伐;实际采

伐强度为:未采伐(对照),14.3%轻度采伐,29.4%中度采伐和 50.4%重度采伐。2013 年、2015 年和 2018 年对四块样地内所有 $DBH \geq 1\text{ cm}$ 的木本植物进行了复测,用以确定林木生长及林分恢复状况。

1.3 采伐指标的量化

本研究选取采伐木断面积、保留木断面积以及采伐强度作为反映采伐程度的指标。其中采伐强度可通过采伐木和保留木断面积计算,其公式为:

$$Int = \frac{BA_{rec}}{BA_{post} + BA_{rec}}$$

式中, BA_{rec} 表示采伐木胸高断面积,而 BA_{post} 表示保留木胸高断面积。在群落水平上,以 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 样方为基本单位,计算采伐木断面积、保留木断面积以及采伐强度。在个体水平上,以目标树为圆心,计算其邻域范围内的采伐木断面积、保留木断面积以及采伐强度。本研究将 2011、2013、2015 及 2018 年四次调查中均存活的林木视为目标树,共计 1343 株。并参照前人的研究,将邻域范围确定为 10 m ,为消除边缘效应的影响,距离样地边缘不足 10 m 的保留木不作为目标树参与分析^[35-36]。

1.4 数据分析

基于采伐前后连续四次样地调查数据,利用特定物种异速生长模型计算单木地上生物量^[37],保留木地上生物量的年均增长量用于量化林木生长,样方内所有保留木地上生物量的年均增长量之和除以样方面积用于量化林分生产力。本研究采用非参数 Wilcoxon 检验,比较了对照处理与采伐处理之间林木及林分生长是否存在显著差异。采用 Kruskal-Wallis 检验,比较了采伐后不同恢复阶段林木及林分生长是否存在显著差异。为量化采伐干扰对林木及林分生长的影响,采用线性回归模型分析不同采伐指标(采伐木断面积、保留木断面积、采伐强度)对林木及林分生长的影响。为确定采伐阈值,采用分段回归模型评估采伐干扰对林分生长的影响。在分段回归模型中,响应变量与解释变量之间的关系是分段线性的,每段回归关系的斜率并不相同,而是存在一个明显的拐点,这个拐点反映了林分生长受到采伐干扰的影响而发生显著变化的临界点,即采伐阈值。以上数据分析过程基于 R 软件实现,其中分段回归以及阈值的确定借助“segmented”软件包^[38]。

2 结果

2.1 采伐干扰对林木生长的影响

在个体水平,本研究首先采用 Wilcoxon 检验,比较了对照与采伐处理下林木生长是否存在显著差异。结果显示:在 2011—2013 年(即伐后 2 年, T_1),对照与采伐处理之间,保留木生物量的年均增长量并无显著差异;而在 2013—2015 年(伐后 2—4 年, T_2)和 2015—2018 年(伐后 4—7 年, T_3)两个时间段,采伐处理下保留木年均生长量显著高于对照处理(图 1)。

本研究采用 Kruskal-Wallis 检验,比较了采伐后不同时间段林木生长是否存在显著差异。结果显示:在采伐后不同阶段,保留木年均生长量均存在显著差异,其中 T_1 阶段相对最低,而 T_3 阶段则相对最高(图 2)。

基于单变量线性回归的结果显示:在 T_1 阶段,三种采伐指标均对保留木年均生长量无显著影响;在 T_2 阶段,保留木断面积对保留木年均生长量具有显著的负效应,采伐强度和采伐木断面积均对保留木年均生长量无显著影响;在 T_3 阶段,保留木断面积对林木胸径年均生长量具有显著的负效应,而采伐强度和采伐木断面积均对林木胸径年均生长量具有显著的正效应(图 3)。

2.2 采伐干扰对林分生长的影响

在群落水平,本研究同样采用 Wilcoxon 检验,比较了对照与采伐处理下林分生产力是否存在显著差异。结果显示:在 T_1 及 T_2 时间段,对照与采伐处理之间林分生产力并未表现出显著差异;而在 T_3 时间段,采伐处理下林分生产力显著低于对照样地(图 4)。

本研究采用 Kruskal-Wallis 检验,比较了采伐后不同时间段林分生产力是否存在显著差异。结果显示:在对照处理下, T_2 及 T_3 阶段的林分生产力显著高于 T_1 阶段,且在 T_2 阶段时林分生产力最高,但与 T_3 阶段差

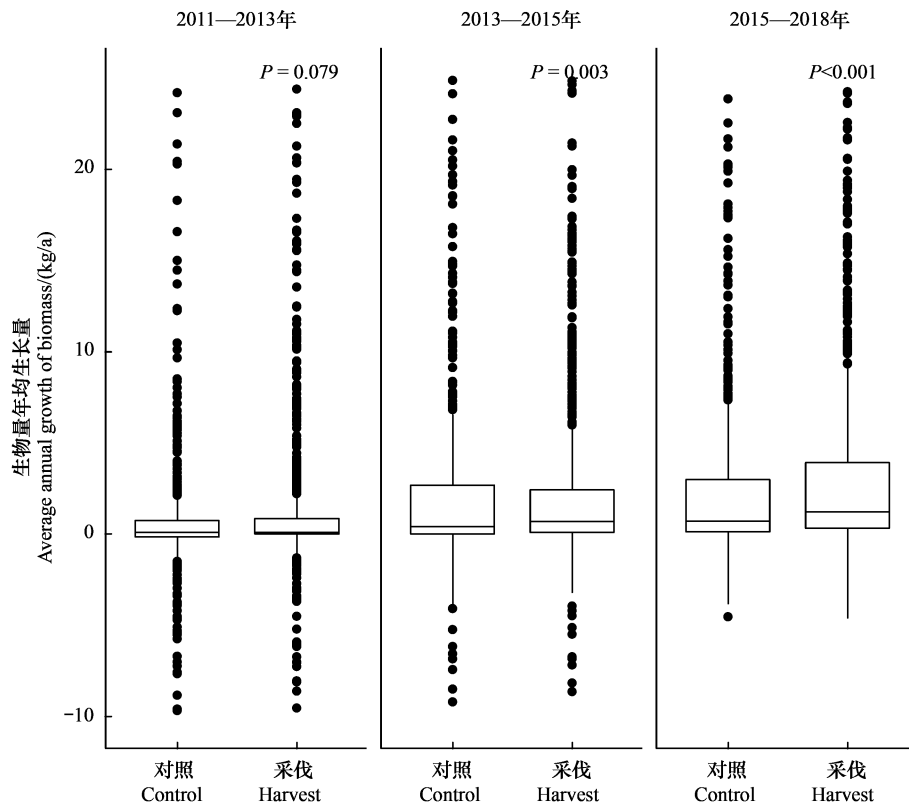


图1 对照与采伐处理下保留木年均生长量差异

Fig.1 Difference in the average annual growth of biomass in unharvested and harvested forests

异不显著;在采伐处理下,不同恢复阶段林分生产力均存在显著差异,T2 阶段显著高于 T3 阶段,而 T3 阶段又显著高于 T1 阶段(图 5)。

基于单变量线性回归的结果显示:在 T1 阶段,保留木断面积对林分生产力具有显著的正效应,采伐木断面积和采伐强度对林分生产力无显著影响;在 T2 和 T3 时间段,保留木断面积对林分生产力具有显著的正效应;采伐木断面积和采伐强度则对林分生产力具有显著的负效应(图 6)。

此外,本研究采用分段回归模型探讨采伐干扰对林分生产力的影响,并确定采伐阈值。结果显示:采伐强度、采伐木断面积与林分生产力之间并不存在显著的拐点,保留木断面积与林分生产力之间则存在明显的拐点:当保留木断面积低于 $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 时,林分生产力随保留木断面积的升高而升高;而当保留木断面积高于 $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 时,林分生产力随保留木断面积的升高而降低(图 7)。

3 讨论

阐明林木生长与林分生产力对采伐干扰的响应有助于全面评估采伐效应,对于制定森林生态修复与可持续经营方案具有十分重要的现实意义。本研究依托吉林蛟河阔叶红松林采伐样地,基于连续四次植被调查数据,从个体和群落水平着手,分别量化了森林采伐对林木生长和林分生产力的影响。

3.1 采伐干扰对林木生长的影响

前人围绕林木生长对采伐干扰的响应开展了大量研究,其中大部分结果表明采伐能够降低林分密度、减少种内种间竞争,在个体水平上对林木生长具有较为显著的促进作用^[39]。本研究结果显示:在采伐后最初的两年内,采伐与对照处理之间林木生长并无显著差异,在采伐后三至七年,采伐处理的林木生长显著高于对照处理。以上结果表明林木生长对采伐干扰的响应存在一定的时滞。这种时滞可能与短期内森林环境的急剧

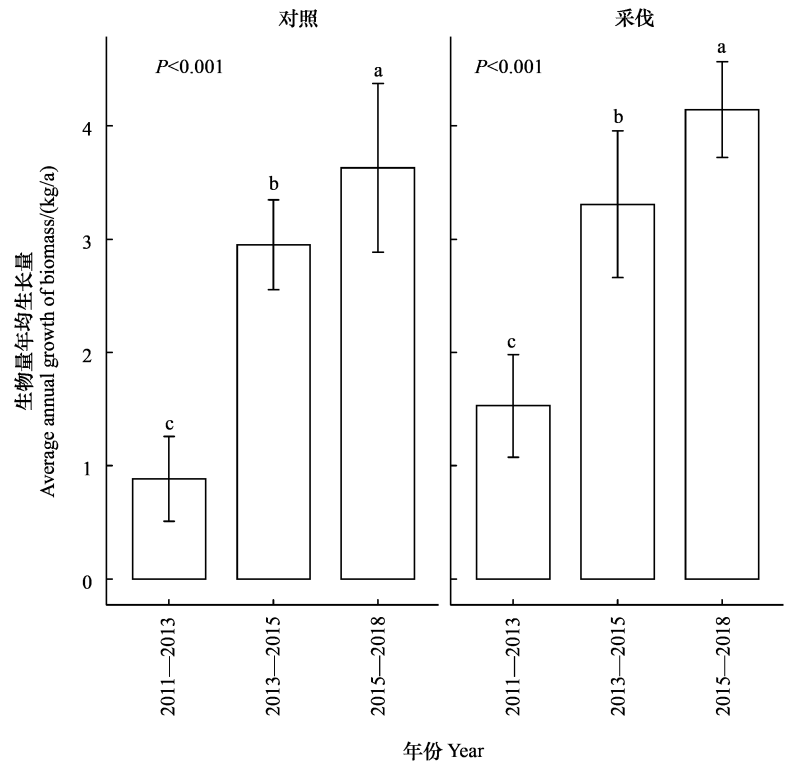


图2 不同恢复时间段对照及采伐处理下保留木年均生长量差异

Fig.2 Difference in the average annual growth of biomass in unharvested and harvested forests with different recovery intervals
不同字母代表差异性显著

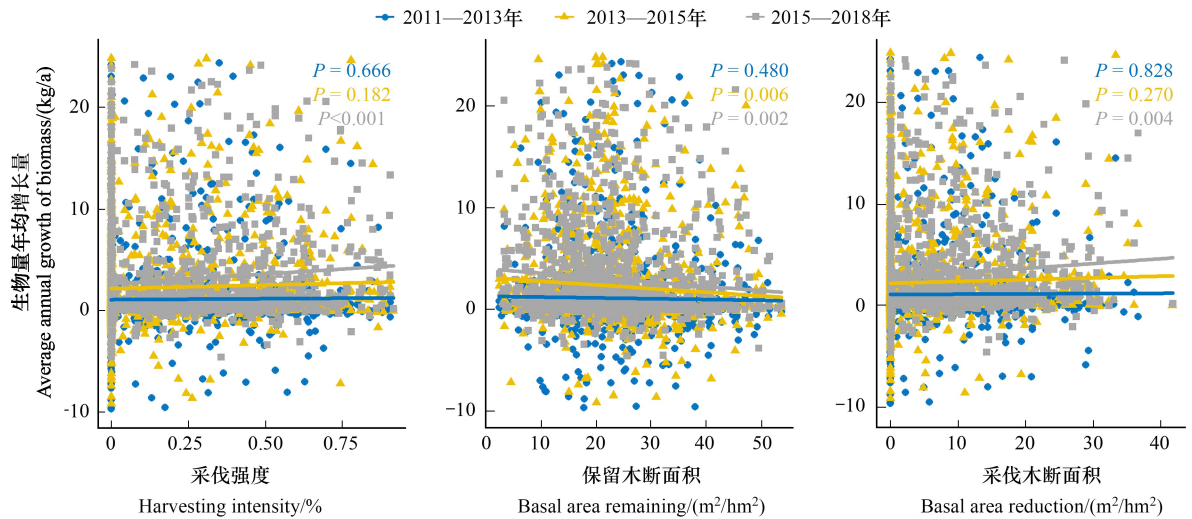


图3 采伐干扰与保留木年均生长量关系

Fig.3 Relationships between harvesting disturbance and average annual growth of biomass

变化有关,采伐在降低林分密度的同时也改变了森林环境,导致土壤温度升高、水分蒸发加快,并可能造成高光及高温胁迫,在这种情况下,林木往往难以迅速适应环境的变化,因此短期内林木生长对采伐干扰的响应可能会出现一定时间的延迟^[25–26,40–41]。Thorpe 等以黑云杉(*Picea mariana*)为研究对象,通过分析年轮数据推测保留林木对采伐干扰的响应为:采伐后两年内林木生长无显著变化,采伐后三到九年为林木快速生长期,之

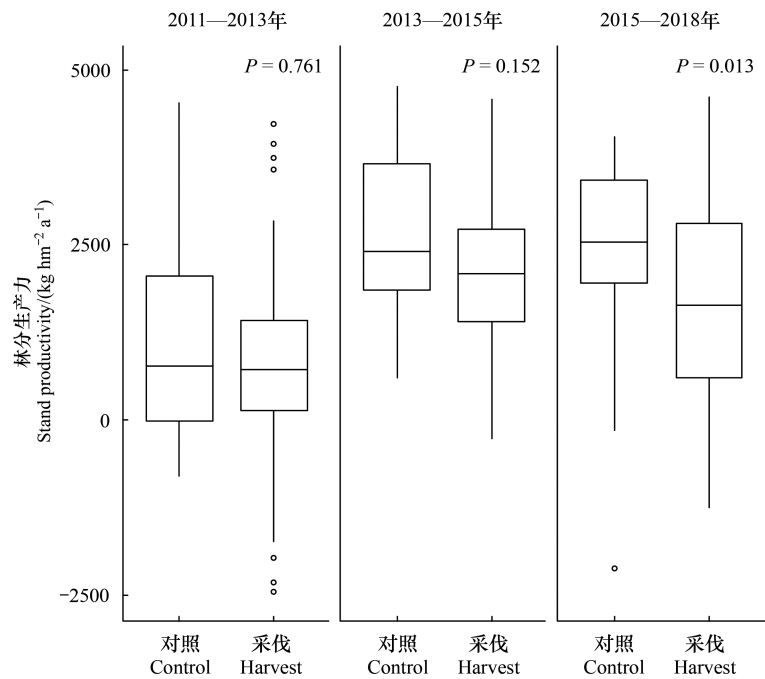


图 4 对照与采伐处理下林分生产力差异

Fig.4 Difference of stand productivity in unharvested and harvested forests

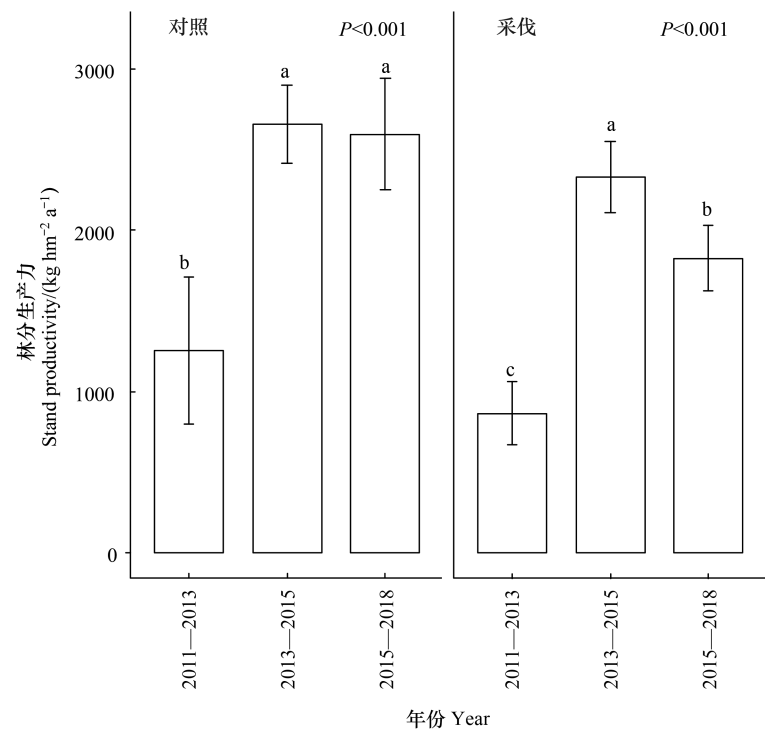


图 5 不同恢复时间段对照及采伐处理下林分生产力差异

Fig.5 Difference of stand productivity in unharvested and harvested forests with different recovery intervals

后生长速率逐渐下降^[42];蒋子涵和金光泽基于年轮数据分析了阔叶红松林主要树种对采伐干扰的响应模式,发现在采伐后 5—15 年间林木的生长达到峰值^[28]。本结果与基于年轮数据得出的结论基本一致,表明采伐

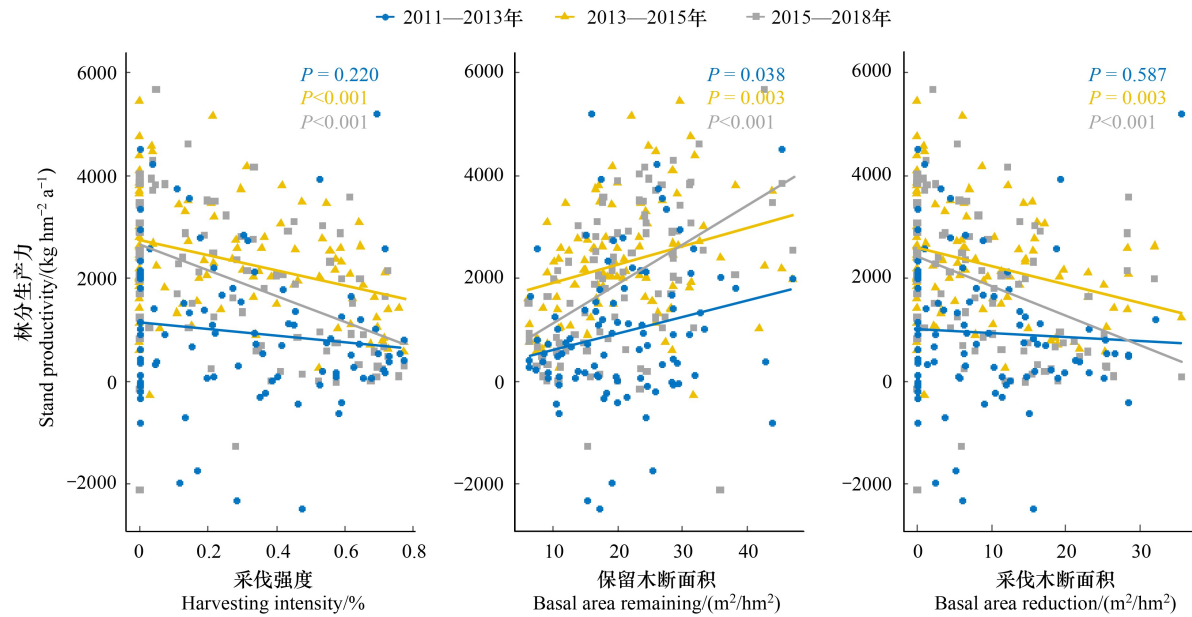


图6 采伐干扰与林分生产力关系

Fig.6 Relationships between harvesting disturbance and stand productivity

通过降低保留木邻域范围内的林木数量与林分密度,能够有效释放生长空间、提升资源的可获取性,进而促进了保留木的生长。基于邻域竞争模型的研究显示,除降低林木数量和林分密度以外,采伐还通过调整保留木邻域空间内的性状组成,改善了保留木之间的竞争关系,研究发现由于采伐使样地内杨、桦等先锋树种的比例大量减少,而先锋树种往往以获取型性状为特征,降低获取型性状的比例有助于为保留木创造更大的营养空间,促进保留木的生长^[6]。另一方面,由于采伐改善了林下光环境,增加了下层植被的光合作用,其对灌木层和草本层的促进作用往往比对乔木层的促进作用更为显著^[43];此外,采伐还提高了林下生境异质性,在促进林下层灌草生长的同时还增加了灌草的物种数量和多样性^[44—45]。

3.2 林分生长对采伐干扰的响应

由于林分生产力的计算不仅依赖于林木的平均生长量,还依赖于样地内林木的株数,因此林木生长和林分生产力对采伐干扰的响应可能并不一致^[17]。本研究结果表明,尽管采伐促进了单木的生长,但由于采伐一次性移除了部分林木、减少了林木株数,进而导致林分生产力下降。以往基于东北地区的研究指出,20%—30%的采伐强度对于森林恢复最为有利^[28,31],因此本研究预测当采伐强度为20%—30%时,林分生产力与采伐强度的回归关系可能会出现明显的拐点。然而基于分段回归的分析结果显示,采伐强度、采伐木断面积与林分生产力关系均不存在明显的拐点,而保留木断面积与林分生产力关系则当保留木断面积为21.6 m²/hm²时出现拐点,即当保留木断面积小于21.6 m²/hm²时,林分生产力随保留木断面积升高而升高,而当保留木断面积大于21.6 m²/hm²时,林分生产力则随保留木断面积的升高而降低。Forget 等以加拿大糖槭(*Acer saccharum*)为研究对象,通过分析采伐10年后保留木的年轮生长数据,发现了类似的结果,即当采伐后保留

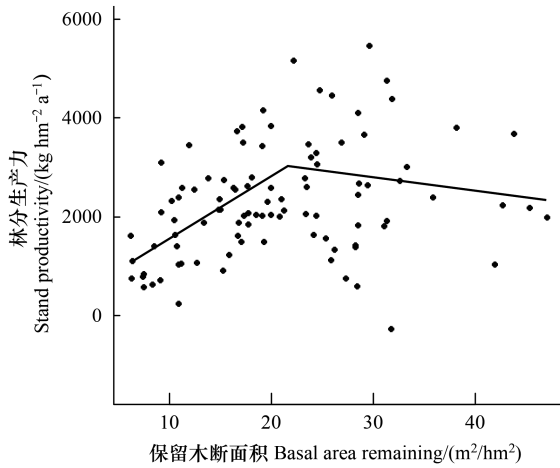


图7 基于分段回归的保留木断面积与林分生产力关系

Fig.7 Relationships between basal area remaining and stand productivity based on segmented regression

木胸高断面积为 $18 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 时,林分恢复状况最佳^[24]。以上结果表明在评价采伐效应时,不仅要关注采伐强度和采伐木断面积,更应该关注保留木断面积,即采伐后林分所达到的密度状态。就本研究样地而言,分段回归表明采伐后林分密度以调整到 $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 为宜,尽管最佳林分密度可能会随环境条件产生一定的波动,该结果仍旧为东北地区阔叶红松林的密度调控与森林采伐提供了一定的参照。

4 结论

采伐干扰会对林木和林分生长产生显著的影响,但林木和林分生长对采伐干扰的响应并不一致:采伐干扰促进了林木生长,并且林木生长随采伐强度和采伐木断面积的升高而升高;采伐干扰降低了林分生产力,并且林分生产力随采伐强度和采伐木断面积的升高而降低。林木和林分生长对采伐干扰的响应存在时滞效应:在采伐后较短的时间(两年)内,林木和林分生长并无显著变化;而在采伐后 3—7 年,林木和林分生长显著增加。此外,基于分段回归模型的结果显示保留木断面积与林分生产力关系存在明显拐点,表明通过密度调整使阔叶红松林胸高断面积维持在 $21.6 \text{ m}^2/\text{hm}^2$ 附近,可保障林分始终处于较高的生产力状态,有利于促进森林恢复、实现可持续经营。最后,需要说明的是,林木和林分生长对采伐干扰的响应受到诸多因素的调控,本研究考虑了空间尺度、时间尺度以及采伐干扰程度对林木和林分生长的短期影响,并未讨论不同气候、环境条件下林木和林分对采伐干扰的响应差异,未来的研究仍需在更加广阔的时空尺度上评价采伐干扰的影响。

参考文献(References):

- [1] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 傅沛云, 李冀云, 曹伟, 丁托娅, 秦忠时, 刘淑珍, 朱彩霞. 东北植物区系地区种子植物区系研究. 云南植物研究, 1995, 17(S7): 1-3.
- [3] 郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳. 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. 植物生态学报, 2008, 32(2): 238-250.
- [4] 郝占庆, 张健, 李步杭, 叶吉, 王绪高, 姚晓琳. 长白山次生杨桦林样地: 物种组成与群落结构. 植物生态学报, 2008, 32(2): 251-261.
- [5] 郝珉辉, 代莹, 岳庆敏, 范春雨, 张春雨. 阔叶红松林功能多样性与森林碳汇功能关系. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 68-76.
- [6] Yue Q M, Geng Y, von Gadow K, Fan C Y, Zhang C Y, Zhao X H. Effects of neighborhood interaction on tree growth in a temperate forest following selection harvesting. Ecological Indicators, 2022, 136: 108663.
- [7] 于大炮, 周旺明, 周莉, 代力民. 长白山区阔叶红松林经营历史与研究历程. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1426-1434.
- [8] Martin P A, Newton A C, Pfeifer M, Khoo M, Bullock J M. Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: a meta-analysis. Forest Ecology and Management, 2015, 356: 224-233.
- [9] Zhou D, Zhao S Q, Liu S, Oeding J. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage. Biogeosciences, 2013, 10(6): 3691-3703.
- [10] Chiang J M, McEwan R W, Yaussy D A, Brown K J. The effects of prescribed fire and silvicultural thinning on the aboveground carbon stocks and net primary production of overstory trees in an oak-hickory ecosystem in southern Ohio. Forest Ecology and Management, 2008, 255(5/6): 1584-1594.
- [11] Curzon M T, D'Amato A W, Fraver S, Palik B J, Bottero A, Foster J R, Gleason K E. Harvesting influences functional identity and diversity over time in forests of the northeastern U.S.A. Forest Ecology and Management, 2017, 400: 93-99.
- [12] Yang H, Man R Z. Effects of partial harvesting on species and structural diversity in aspen-dominated boreal mixedwood stands. Forest Ecology and Management, 2018, 409: 653-659.
- [13] Storch F, Kändler G, Bauhus J. Assessing the influence of harvesting intensities on structural diversity of forests in south-west Germany. Forest Ecosystems, 2019, 6(1): 1-12.
- [14] 郝珉辉, 李晓宇, 夏梦洁, 何怀江, 张春雨, 赵秀海. 抚育采伐对蛟河次生针阔混交林功能结构和谱系结构的影响. 林业科学, 2018, 54(5): 1-9.
- [15] Bataineh M, Kenefic L, Weiskittel A, Wagner R, Brissette J. Influence of partial harvesting and site factors on the abundance and composition of natural regeneration in the Acadian Forest of Maine, USA. Forest Ecology and Management, 2013, 306: 96-106.
- [16] 胡艳波, 惠刚盈. 优化林分空间结构的森林经营方法探讨. 林业科学研究, 2006, 19(1): 1-8.
- [17] 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 张则路, 陈晓光. 抚育间伐对落叶松云冷杉混交林的影响. 林业科学, 2005, 41(4): 78-85.
- [18] Kunhamu T K, Kumar B M, Viswanath S. Does thinning affect litterfall, litter decomposition, and associated nutrient release in Acacia mangium stands of Kerala in peninsular India? Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(4): 792-801.
- [19] Vargas R, Allen E B, Allen M F. Effects of vegetation thinning on above- and belowground carbon in a seasonally dry tropical forest in Mexico. Biotropica, 2009, 41(3): 302-311.
- [20] Horner G J, Baker P J, Mac Nally R, Cunningham S C, Thomson J R, Hamilton F. Forest structure, habitat and carbon benefits from thinning

- floodplain forests: managing early stand density makes a difference. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 286-293.
- [21] Sawadogo L, Tiveau D, Nygård R. Influence of selective tree cutting, livestock and prescribed fire on herbaceous biomass in the savannah woodlands of Burkina Faso, West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(1/2): 335-345.
- [22] Skovsgaard J P. Analysing effects of thinning on stand volume growth in relation to site conditions: a case study for even-aged Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2009, 82(1): 87-104.
- [23] Zhang C Y, Zhao X H, Gadow K V. Analyzing selective harvest events in three large forest observational studies in North Eastern China. *Forest Ecology and Management*, 2014, 316: 100-109.
- [24] Forget E, Nolet P, Doyon F, Delagrange S, Jardon Y. Ten-year response of northern hardwood stands to commercial selection cutting in southern Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 764-775.
- [25] Bose A K, Brais S, Harvey B D. Trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx.) volume growth in the boreal mixedwood: effect of partial harvesting, tree social status, and neighborhood competition. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 209-220.
- [26] Bose A K, Harvey B D, Brais S, Beaudet M, Leduc A. Constraints to partial cutting in the boreal forest of Canada in the context of natural disturbance-based management: a review. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2014, 87(1): 11-28.
- [27] Xing D L, Nielsen S E, MacDonald S E, Spence J R, He F L. Survival and growth of residual trees in a variable retention harvest experiment in a boreal mixedwood forest. *Forest Ecology and Management*, 2018, 411: 187-194.
- [28] 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.
- [29] 范春雨, 张春雨, 赵秀海. 择伐对吉林蛟河阔叶红松林群落结构及动态的影响. *生态学报*, 2017, 37(20): 6668-6678.
- [30] de Avila A L, van der Sande M T, Dormann C F, Peña-Claros M, Poorter L, Mazzei L, Ruschel A R, Silva J N M, de Carvalho J O P, Bauhus J. Disturbance intensity is a stronger driver of biomass recovery than remaining tree-community attributes in a managed Amazonian forest. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(4): 1647-1657.
- [31] 董希斌, 王立海. 采伐强度对林分蓄积生长量与更新影响的研究. *林业科学*, 2003, 39(6): 122-125.
- [32] Döbert T F, Webber B L, Sugau J B, Dickinson K J M, Didham R K. Logging increases the functional and phylogenetic dispersion of understorey plant communities in tropical lowland rain forest. *Journal of Ecology*, 2017, 105(5): 1235-1245.
- [33] Anand R, Trevor C T, der Hout Peter V, Eric A, Putz Francis E. Trade-offs between carbon stocks and timber recovery in tropical forests are mediated by logging intensity. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 2862-2874.
- [34] Mahayani N P D, Slik F J W, Savini T, Webb E L, Gale G A. Rapid recovery of phylogenetic diversity, community structure and composition of Bornean tropical forest a decade after logging and post-logging silvicultural interventions. *Forest Ecology and Management*, 2020, 476: 118467.
- [35] Lasky J R, Uriarte M, Boukili V K, Chazdon R L. Trait-mediated assembly processes predict successional changes in community diversity of tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(15): 5616-5621.
- [36] Luo W X, Liang J J, Cazzolla Gatti R, Zhao X H, Zhang C Y. Parameterization of biodiversity-productivity relationship and its scale dependency using georeferenced tree-level data. *Journal of Ecology*, 2019, 107(3): 1106-1119.
- [37] He H J, Zhang C Y, Zhao X H, Foussemi F, Wang J S, Dai H J, Yang S, Zuo Q A. Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, Northeastern China. *PLoS One*, 2018, 13(1): e0186226.
- [38] Muggeo, V M. Segmented: an R package to fit regression models with broken-line relationships. *R news*, 2008, 8(1): 20-25.
- [39] 张晓红, 张会儒, 卢军, 雷相东. 目标树抚育间伐对蒙古栎天然次生林生长的初期影响. *林业科学*, 2020, 56(10): 83-92.
- [40] von Gadow K, Schmidt M. Periodische inventuren und eingriffsinventuren. *Forst und Holz*, 1998, 53: 667-671.
- [41] Bladon K D, Silins U, Landhäusser S M, Lieffers V J. Differential transpiration by three boreal tree species in response to increased evaporative demand after variable retention harvesting. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1/2/3/4): 104-119.
- [42] Thorpe H C, Thomas S C, Caspersen J P. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(9): 1563-1571.
- [43] 范春楠, 刘强, 郑金萍, 郭忠玲, 张文涛, 刘英龙, 谢遵俊, 任增君. 采伐强度对阔叶红松林生态系统碳密度恢复的影响. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10): 33-42.
- [44] 何怀江, 张忠辉, 张春雨, 郝珉辉, 姚杰, 解蛰, 高海涛, 赵秀海. 采伐强度对东北针阔混交林林分生长和物种多样性的短期影响. *林业科学*, 2019, 55(2): 1-12.
- [45] Aun K, Kukumägi M, Varik M, Becker H, Aosaar J, Uri M, Buht M, Uri V. Short-term effect of thinning on the carbon budget of young and middle-aged silver birch (*Betula pendula* Roth) stands. *Forest Ecology and Management*, 2021, 480: 118660.