

DOI: 10.5846/stxb201901260198

宣海憧, 郭梦昭, 高露双, 范春雨. 竞争强度变化对针阔混交林红松和水曲柳径向生长的影响. 生态学报, 2020, 40(12): 4087-4093.

Xuan H H, Guo M Z, Gao L S, Fan C Y. Effect of competition environment changes on the radial growth of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* in mixed coniferous-broad-leaved forest. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4087-4093.

竞争强度变化对针阔混交林红松和水曲柳径向生长的影响

宣海憧, 郭梦昭, 高露双*, 范春雨

北京林业大学林学院, 北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点开放性实验室, 国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083

摘要:以 3 种间伐强度处理下 (15%, 30% 和 50%) 针阔混交林内优势树种红松 (*Pinus koraiensis*) 和水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 为研究对象, 基于 3 次复测数据和树轮宽度数据分析不同间伐强度处理下红松和水曲柳的竞争变化特征, 探讨竞争环境变化对保留木径向生长的影响。结果表明, 1) 红松保留木竞争环境发生变化的单木比例随着间伐强度增加而有所下降, 但竞争减弱的保留木所占比例与间伐强度正相关, 重度间伐样地内竞争减弱的红松保留木所占比例最大达到 63%。不同间伐强度下水曲柳保留木竞争环境发生变化的单木比例一致, 竞争减弱的单木比例占 50%。2) 不同竞争环境的水曲柳保留木径向生长趋势基本一致, 而红松保留木径向生长变化趋势有所不同。轻度和重度间伐样地内竞争减弱的红松保留木径向生长在间伐后均呈上升趋势, 而中度间伐样地内竞争减弱的红松保留木和各样地竞争不变的红松保留木以及不同竞争强度下水曲柳保留木均在 2013 年和 2014 年 (间伐后 2 年内) 出现生长抑制, 而在 2015 年 (伐后第 3 年) 得到促进。3) 随着间伐强度上升, 自 2015 年 (伐后第 3 年) 竞争减弱的红松保留木径向生长年增量明显增加, 显著高于竞争不变的红松 ($P < 0.05$), 而竞争减弱的水曲柳保留木径向生长年增量自 2014 年 (伐后第 2 年) 在重度间伐样地内增加幅度最大, 其次为轻度间伐样地, 而在中度间伐样地内增加幅度最低。

关键词: 红松; 水曲柳; 径向生长; 竞争减弱; 竞争不变

Effect of competition environment changes on the radial growth of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* in mixed coniferous-broad-leaved forest

XUAN Haichong, GUO Mengzhao, GAO Lushuang*, FAN Chunyu

College of Forestry, Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management of State Forestry and Grassland Administration, Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* as the dominant tree species in mixed coniferous-broad-leaved forest under three thinning intensities (low 15%, moderate 30%, and severe 50%) were studied in this paper. The competitive characteristics of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* under different thinning intensities were quantified with three times repeated investigation and tree ring width data. The effects of varied competitive environment on radial growth were analyzed. The results showed that: 1) the proportion of individual trees with change in competitive environment of *Pinus koraiensis* residual trees decreased with the increase of thinning intensity, but the proportion of retained trees with weakening competition was positively correlated with the thinning intensity. The largest proportion of *Pinus koraiensis* residual trees with weakening competition was 63%, in the heavy thinning plot. The proportion of individual trees with changed in competitive environment of *Fraxinus mandshurica* residual trees was the same in three plots, accounting for 50%. 2) In different

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2019ZY22); 国家自然科学基金项目 (31600509)

收稿日期: 2019-01-26; 网络出版日期: 2020-04-09

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

competitive environments, the consistent radial growth trends of *Fraxinus mandshurica*, but differential radial growth trends of *Pinus koraiensis* were observed. The radial growth tendency of *Pinus koraiensis* reserved trees with weakening competition in low and heavy thinning plot was raised. The radial growth of *Pinus koraiensis* reserved trees with weakening competition in the moderate thinning plot, *Pinus koraiensis* reserved trees with unchanged competition in all plots and *Fraxinus mandshurica* reserved trees in different competition intensities were reduced in 2013 and 2014 (within 2012 after thinning), but promoted in 2015 (the third year after thinning). 3) With the increase of thinning intensity, the annual increment of radial growth of *Pinus koraiensis* reserved trees with weakening competition has been increased since 2015 (the third year after thinning), which was significantly higher than that of *Pinus koraiensis* reserved trees with unchanged competition ($P < 0.05$). Since from 2014 (the second year after thinning), the annual increment of radial growth of *Fraxinus mandshurica* reserved trees with weakening competition was increased, with the largest one in the heavily thinning plot, followed by the light thinning plot. The lowest increase in annual increment of radial growth was found in moderate thinning plot.

Key Words: *Pinus koraiensis*; *Fraxinus mandshurica*; radial growth; reduced competition; unchanged competition

采伐活动作为主要的人为干扰因素,是调整森林结构和功能的重要手段^[1-3]一直受到国内外众多研究学者的关注^[4-5]。大量研究表明,保留木的生长量随着采伐强度的增加呈现上升趋势^[6-8],Deal 和 Tappeiner^[9]对阿拉斯加西南部的北美铁杉林和 Man 等^[10]对北方针叶林的研究结果进一步证明了采伐对不同径级保留木生长量均具有促进作用。但也有研究指出,采伐后的 1—2 年内保留木生长量并没有出现明显的增加趋势,甚至随着采伐强度增加,部分保留木生长量出现降低的现象^[11-12]。保留木生长受到物种特性,采伐强度^[13]等多种因素的作用。保留木生长与采伐后林内其所处竞争环境的改变程度密切相关,而不同树种对竞争环境的响应滞后性也将改变保留木生长特征^[14],这就导致采伐活动对保留木生长的影响具有一定的复杂性^[15]。

因此,有必要基于物种特性和间伐强度检验时间尺度上竞争强度变化对保留木生长的影响,该结果对于当前森林经营与管理有着重要意义^[16-17]。本研究基于吉林蛟河针阔混交林内 2012 年进行不同间伐强度处理的 3 块固定样地,以顶级树种红松和水曲柳为研究对象,试图回答以下问题:(1) 不同间伐强度下红松和水曲柳保留木竞争强度变化特征(2) 不同竞争强度变化下保留木生长是否存在差异。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

2011 年 7 月,在蛟河实验区管理局大坡林场,按照 CTFS(Center for Tropical Forest Science, CTFS)标准在地形和林分状况大体一致的近熟林内设置 3 块面积为 1 hm²(100 m×100 m)的固定样地,分别为 2 号样地(43°57.9625'N, 127°43.5727'E,海拔 443 m)、3 号样地(43°57.9087'N, 127°43.4510'E,海拔 430 m)和 4 号样地(43°57.8784'N, 127°43.5560'E 海拔 447 m),并对样地内 DBH≥10 cm 全部个体进行调查,调查项目包括:号牌编码、物种名称、胸径、树高、枝下高、冠幅(东西长、南北长),并记录生长状况(枯立、枯倒、断头等)等信息。2012 年 12 月以胸高断面积为指标确定间伐强度,按照间密留匀,留优去劣的原则,对 3 块样地实施不同强度的抚育措施,以达到调整林分结构和促进保留木生长的目的。间伐强度分别为:2 号样地 15%(轻度间伐)、3 号样地 30%(中度间伐)和 4 号样地 50%(重度间伐)。该区域气候为温带大陆性季风气候,年均温在 3.7℃以下,7 月最热平均气温为 21.7℃,1 月最冷平均气温为-18.6℃,年均降水量在 700 mm 左右,地带性土壤为暗棕色土壤,森林群落类型为典型的针阔混交林,主要乔木树种包括红松(*Pinus koraiensis*)、千金榆(*Carpinus cordata*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、色木槭(*A. mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、春榆(*Ulmus japonica*)等,主要灌木包括暴马丁香(*Syringa reticulata*)、瘤枝卫矛(*Euonymus pauciflorus*)和东北鼠李(*Rhamnus davurica*)等。红松和水曲柳是针阔混交林的顶级树种。红松属于浅根性树种,对土壤水分要求较严,对土壤的排水和通气状况反应敏感,不耐湿,不耐干旱,不耐

盐碱。水曲柳喜光、耐寒,喜肥沃湿润土壤。鉴于两树种对生长环境的敏感度不同,因此,本研究选取典型针叶树种红松和阔叶树种水曲柳为研究对象。

1.2 研究方法

1.2.1 样芯采集与生长量数据获取

2013 年,2015 年和 2017 年分别对间伐样地进行复测,复测项目包括:号牌编码、树种名称、胸径和生长状况,以确定实际采伐强度。经复测后计算得出样地实际采伐强度分别为 17.24%、34.74%和 51.87%(表 1)。2017 年 8 月在 2 号,3 号和 4 号样地内采集 DBH ≥ 10 cm 的红松和水曲柳的保留木胸径处宽度样芯(内径 5.15 mm)。将样芯带回实验室进行处理后,利用 LINTAB 5 年轮宽度测定仪器获取红松和水曲柳的连年径向生长量(0.01 mm 精度),通过 COFECHA 软件对数据的可靠性进行验证,交叉定年核定后,结合 3 次复测的胸径数据,重建各样地内红松和水曲柳历史胸径数据。

表 1 采伐前后样地林分特征

Table 1 The topography and stand characteristics before thinning of four plots

| 处理措施 Treat style | | 林分密度 Density/ (株/hm ²) | 平均胸径 Mean diameter at breast height/cm | 平均树高 Mean height/m | 胸高断面积 Basal area/m ² | 郁闭度 Canopy density |
|---------------------|----|--|--|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| LT | 伐前 | 1045 | 13.9 | 9.6 | 29.4726 | 0.9 |
| | 伐后 | 844 | 13.77 | 9.8 | 24.391 | 0.8 |
| MT | 伐前 | 1007 | 14.8 | 9.7 | 30.3823 | 0.9 |
| | 伐后 | 726 | 14.83 | 9.9 | 19.827 | 0.6 |
| HT | 伐前 | 1298 | 12.4 | 8.8 | 30.474 | 0.9 |
| | 伐后 | 717 | 12.69 | 8.9 | 14.668 | 0.5 |

LT: 轻度采伐 Light thinning plot; MT: 中度采伐 Moderate thinning plot; HT: 重度采伐 Heavy thinning plot

1.2.2 竞争指标选取与量化

根据 Hegyi 单木竞争指数模型公式计算出 2012 年(间伐当年)和 2013 年(伐后次年)每个竞争木对对象木的竞争指数,将 2013 年和 2012 年竞争指数相减即得该树种的竞争强度变化程度。本研究设置了 10 m 的缓冲区域排除边缘效应,10 m 的缓冲区内未选取对象木,仅选取竞争木,从而可以保证距离对象木最近的相邻木均在样地内。具体计算公式为:

$$\text{Hegyi} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{D_j}{D_i} \times \frac{1}{d_{ij}} \right)^{[18]} \quad (1)$$

$$\text{aba} = \text{Hegyi}_{\text{伐后}} - \text{Hegyi}_{\text{伐前}} \quad (2)$$

式中, D_j 代表相邻树胸径(cm), D_i 代表目标树胸径(cm), d_{ij} 代表相邻树与目标树距离(m)。aba 代表目标树间伐前后竞争指数的差值, $\text{Hegyi}_{\text{伐后}}$ 为目标树伐后次年的竞争指数, $\text{Hegyi}_{\text{伐前}}$ 为目标树间伐当年的竞争指数。

将树木竞争指数变化 aba 在 5% 以内的树木定义为竞争强度未发生变化,竞争指数变化大于 5% 的树木定义为竞争强度变大或变小,将 aba 为正数的目标树定义为竞争强度增强的树木,aba 为负数的目标树定义为竞争强度减弱的树木。将竞争强度变化的保留木株数与各样地内该物种株树总数的比值定义为不同物种竞争强度发生变化的比例。通过配对 T 检验在 0.05 水平检验不同竞争强度变化下保留木径向生长是否存在差异,以上数据分析过程由 R 3.6.1 完成。

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度下红松和水曲柳竞争强度变化特征

不同间伐强度下红松和水曲柳竞争强度变化有所不同(表 2)。各间伐样地内水曲柳保留木竞争强度发生变化的单木所占比例基本一致,均达到 65% 以上,且有 50% 的水曲柳保留木的竞争强度均出现减弱的趋势。而红松保留木竞争强度发生变化的单木比例随着间伐强度增加而有所下降,但发生竞争减弱的保留木所

占比例与间伐强度正相关。在轻度间伐样地内 77% 的红松保留木竞争强度均发生了变化,其中 47% 红松保留木竞争强度减弱,23% 的红松保留木甚至出现竞争强度增加,在中度间伐样地内有 64% 红松保留木竞争强度发生变化,55% 的红松保留木竞争强度减弱,在重度间伐样地内 64% 红松保留木竞争强度发生变化,63% 为竞争强度减弱。

表 2 不同间伐强度下林木竞争强度变化特征

Table 2 The variation of tree competition environment under different thinning intensities

| 样地 Site | 树种 Species | 树木竞争强度改变比例 Tree competition environment change ratio | | |
|------------|---------------------------------|--|--|--|
| | | 竞争强度增强比例 Proportion of increased competition intensity/% | 竞争强度减弱比例 Proportion of weakening competition intensity/% | 竞争不变比例 Proportion of unchanged competition intensity/% |
| LT | 红松 <i>Pinus koraiensis</i> | 23 | 47 | 30 |
| | 水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i> | 18 | 59 | 23 |
| MT | 红松 <i>Pinus koraiensis</i> | 9 | 55 | 36 |
| | 水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i> | 11 | 55 | 34 |
| HT | 红松 <i>Pinus koraiensis</i> | 1 | 63 | 36 |
| | 水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i> | 5 | 54 | 41 |

2.2 不同竞争环境的红松和水曲柳保留木径向生长差异性分析

不同竞争环境下红松保留木径向生长变化趋势有所不同(图 1)。轻度和重度间伐样地内竞争减弱的红松保留木径向生长在间伐后均呈上升趋势,而中度间伐样地内竞争减弱的红松保留木和各样地竞争不变的红松保留木径向生长在间伐后均呈上升趋势,而中度间伐样地内竞争减弱的红松保留木和

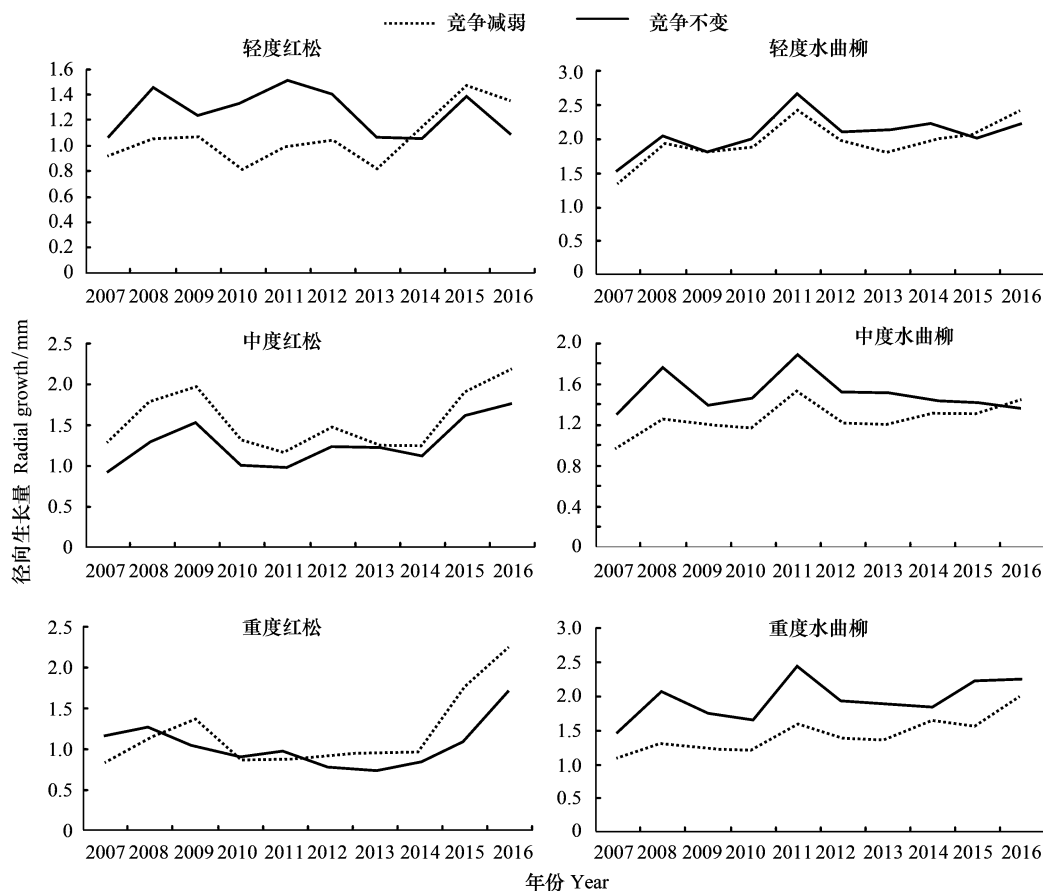


图 1 不同竞争强度下红松和水曲柳径向生长量变化趋势

Fig.1 Radial growth tendency of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* under different competitive intensity

松保留木径向生长则先出现下降(伐后 2 年内),而后出现上升。不同间伐样地内不同竞争环境红松保留木径向生长增加幅度也存在显著差异(图 2)。竞争减弱的红松保留木径向生长在 2015 年(伐后第 3 年)随着间伐强度升高生长量增加,而竞争不变的红松保留木径向生长则未随着间伐强度增加而呈现任何规律性的变化。在轻度间伐样地内竞争不变的红松保留木径向生长在 2013 和 2014 年间(伐后 2 年内)径向生长下降幅度为 0.2 mm,而竞争减弱的红松保留木径向生长增加幅度为 0.35 mm,在 2015 年(伐后第 3 年)由伐前竞争不变的红松保留木径向生长显著高于竞争减弱的红松保留木($P<0.05$)转变为二者不存在显著差异($P=0.92$)。而在中度和重度间伐样地内竞争减弱的红松保留木径向生长年增量在 2015 年分别达到 0.69 mm 和 0.79 mm,使得竞争减弱的红松保留木径向生长显著高于竞争不变的红松保留木($P<0.05$)。

不同竞争环境下水曲柳保留木径向生长趋势基本一致(图 1),均在 2013 年和 2014 年(间伐后 2 年内)出现生长抑制,而在 2015 年(伐后第 3 年)得到促进,但径向生长增加幅度有所不同,且竞争减弱的水曲柳保留木径向生长年增量与间伐强度密切相关(图 2)。自 2014 年(伐后第 2 年),重度间伐样地内竞争减弱的水曲柳径向生长增加幅度最大,其次为轻度间伐样地,而在中度间伐样地内增加幅度最低。在轻度间伐样地内竞争减弱的水曲柳保留木径向生长在伐后第 5 年显著高于竞争不变的水曲柳($P<0.05$)。在中度和重度间伐样地内,竞争减弱的水曲柳保留木径向生长由间伐前显著低于竞争不变的水曲柳保留木($P<0.05$)转变为在伐后第 5 年与竞争不变的水曲柳保留木径向生长不存在显著差异($P=0.89$)。竞争不变的水曲柳保留木径向生长的年增量与间伐强度没有明显的相关关系。

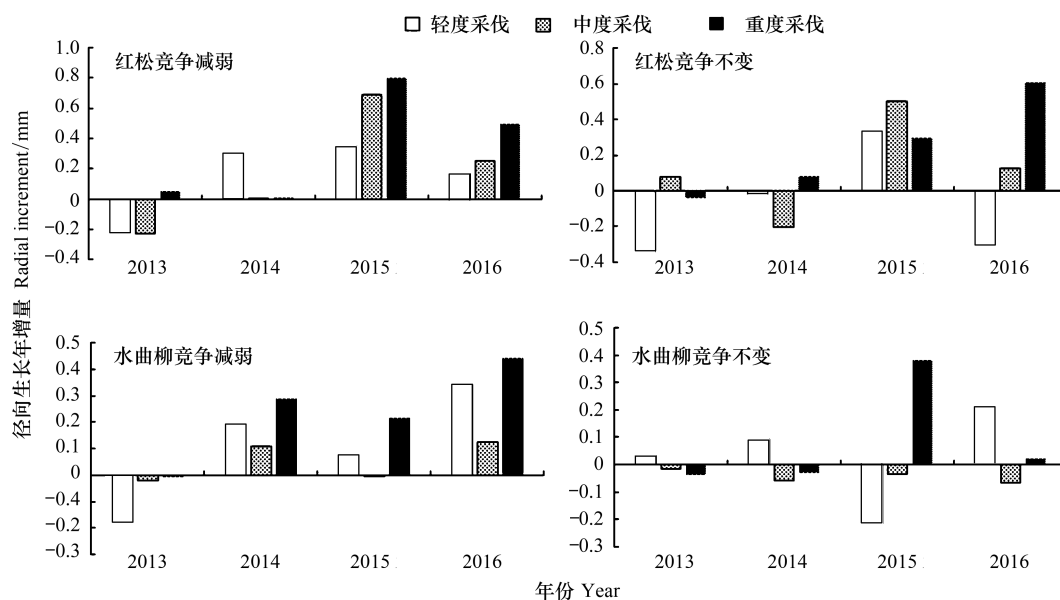


图 2 不同间伐强度下红松和水曲柳保留木径向生长年增量变化

Fig.2 Increment of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* residual trees under different thinning density

3 讨论

不同间伐强度下树木竞争环境变化具有明显差异^[19]。本研究三个样地林分水平采伐强度分别为 17.24%、34.74%和 51.87%,红松保留木竞争强度发生变化的单木比例随着间伐强度增加而有所下降,但发生竞争减弱的保留木所占比例与间伐强度正相关,而各样地内水曲柳竞争环境发生变化的单木所占比例基本一致。在物种丰富的林分中物种水平的间伐强度的影响可能会突显^[20],本研究各样地内红松和水曲柳的物种采伐强度与林分水平采伐强度不同,其中红松的采伐强度分别为 14%、11%和 18%,而水曲柳的采伐强度为 16%、17%和 19%。因此,红松保留木竞争环境变化对林分水平间伐强度更敏感,而水曲柳保留木竞争环境可

能受到物种水平间伐强度的影响。

采伐干扰下树木生长与竞争环境的变化密切相关^[20],前人研究指出保留木径向生长量与采伐强度间呈正相关关系^[7],随着采伐强度的升高保留木直径的生长也随之增加^[8,21]。本文研究发现仅竞争减弱的红松和水曲柳保留木径向生长与间伐强度密切相关。竞争减弱的红松保留木径向生长在 2015 年(伐后第 3 年)呈现随间伐强度升高生长量增加的趋势,而水曲柳保留木随着间伐强度增加呈现先下降而后增加的趋势。在林分中伐后竞争强度下降的树种竞争能力增强进而生长得到促进^[22-23]。采伐活动可能增加森林内部的温度和空气流动能力,改变林内的光照和温度条件,显著增加部分树木进行光合作用的强度和时间,进而加速植物的蒸腾作用和土壤水分的蒸发,导致部分树木在伐后的 1—2 年内出现生长下降的现象^[24-25]。采伐后一般能够提高林内降雨量,但由于光照条件增强,林内空气湿度有降低趋势,对土壤温湿度及土壤理化性质产生显著影响^[26]。红松和水曲柳对土壤水分条件的适应差异可能是导致间伐后红松和水曲柳径向生长变化存在不同的原因,针叶树和阔叶树对采伐强度的响应差异也有一定的影响^[11,27]。竞争减弱的红松和水曲柳保留木的径向生长均在 2015 年(伐后第 3 年)呈现快速增加趋势则证实树木生长对采伐活动的响应可能存在一定的时间延迟^[14]

综上,不同间伐处理下物种竞争强度变化明显不同,而不同竞争环境下保留木径向生长对间伐强度的响应也具有一定差异性,其响应关系受到间伐强度和物种特性的共同影响,51.87% 以内的间伐强度将有利于 65% 的竞争减弱红松保留木径向生长,而水曲柳保留木径向生长对间伐强度的响应更复杂,且可能对物种间伐强度更敏感,因此,利用间伐活动调整针阔混交林林分结构时应考虑间伐处理后竞争强度变化的单木所占比例,以及物种水平间伐强度对保留木生长的影响。

参考文献 (References):

- [1] Cannon C H, Peart D R, Leighton M. Tree species diversity in commercially logged Bornean rainforest. *Science*, 1998, 281(5381): 1366-1368.
- [2] Asner G P, Knapp D E, Broadbent E N, Oliveira P J C, Keller M, Silva J N. Selective logging in the Brazilian amazon. *Science*, 2005, 310(5747): 480-482.
- [3] Chazdon R L, Peres C A, Dent D, Sheil D, Lugo A E, Lamb D, Stork N E, Miller S E. The potential for species conservation in tropical secondary forests. *Conservation Biology*, 2009, 23(6): 1406-1417.
- [4] Imai N, Seino T, Aiba S I, Takyu M, Titin J, Kitayama K. Effects of selective logging on tree species diversity and composition of Bornean tropical rain forests at different spatial scales. *Plant Ecology*, 2012, 213(9): 1413-1424.
- [5] 安玉泽, 田洪华, 孙亚萍. 不同采伐强度对森林土壤温度影响的探讨. *森林工程*, 2006, 22(2): 1-2.
- [6] Simard S W, Blenner-Hassett T, Cameron I R. Pre-commercial thinning effects on growth, yield and mortality in even-aged paper birch stands in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2004, 190(2/3): 163-178.
- [7] Forget E, Nolet P, Doyon F, Delagrangé 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.
- [8] 董希斌. 采伐强度对落叶松林生长量的影响. *东北林业大学学报*, 2001, 29(1): 44-47.
- [9] Deal R L, Tappeiner J C. The effects of partial cutting on stand structure and growth of western hemlock-Sitka spruce stands in southeast Alaska. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(3): 173-186.
- [10] Man R Z, Kayahara G J, Rice J A, MacDonald G B. Eleven-year responses of a boreal mixedwood stand to partial harvesting: light, vegetation, and regeneration dynamics. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 697-706.
- [11] 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.
- [12] Staschel R, Greger O. Vergleich des Radialzuwachses einzeln und gruppiert stehender Altkiefern in einem Buchengrundbestand: Gedanken zur Durchforstungspraxis. *Groenekennis*, 1993, 48(18): 515-519.
- [13] Hui G Y, Wang Y, Zhang G Q, Zhao Z H, Bai C, Liu W Z. A novel approach for assessing the neighborhood competition in two different aged forests. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 49-58.
- [14] 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.
- [15] 杜纪山, 唐守正. 抚育间伐对林分生长的效应及其模型研究. *北京林业大学学报*, 1996, 18(1): 79-83.

- [16] Bauhus J, Puettmann K, Messier C. Silviculture for old-growth attributes. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(4): 525-537.
- [17] Boyden S, Montgomery R, Reich P B, Palik B. Seeing the forest for the heterogeneous trees; stand - scale resource distributions emerge from tree - scale structure. *Ecological Applications*, 2012, 22(5): 1578-1588.
- [18] Vitali V, Brang P, Cherubini P, Zingg A, Nikolova P S. Radial growth changes in Norway spruce montane and subalpine forests after strip cutting in the Swiss Alps. *Forest Ecology and Management*, 2016, 364: 145-153.
- [19] 胡刚, 梁士楚, 张忠华, 许为斌. 桂林岩溶石山青冈栎种内与种间竞争的数量关系. *西北林学院学报*, 2007, 22(5): 32-36.
- [20] Zhao D H, Borders B, Wilson M, Rathbun S L. Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species-rich forest. *Ecological Modelling*, 2006, 196(1/2): 90-102.
- [21] 张水松, 陈长发, 吴克选, 占有生, 何寿庆. 杉木林间伐强度试验 20 年生长效应的研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 56-65.
- [22] 李先琨, 苏宗明, 欧祖兰, 宁世江, 唐润琴, 李瑞棠. 元宝山冷杉群落种内与种间竞争的数量关系. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(1): 20-24.
- [23] 张池, 黄忠良, 李炯, 史军辉, 李林. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 22-26.
- [24] Matussek R, Čermák J, Kučera J. Ursacheneingrenzung eines lokalen Buchensterbens mit einer Meßmethode der Kronentranspiration. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 1991, 142: 809-828.
- [25] Jose S, Merritt S, Ramsey C L. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedlings to light, water and nitrogen. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1/3): 335-344.
- [26] 吴际友, 龙应忠, 董方平, 余格非, 胡蝶梦. 湿地松人工林间伐效果初步研究. *林业科学研究*, 1995, 8(6): 630-633.
- [27] Pamerleau-Couture É, Krause C, Pothier D, Weiskittel A. Effect of three partial cutting practices on stand structure and growth of residual black spruce trees in north-eastern Quebec. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2015, 88(4): 471-483.