



竞争和气候对新疆阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的影响

康 剑^{1,2,3} 梁寒雪^{1,3} 蒋少伟^{1,2,3} 朱火星^{1,3} 周 鹏^{1,2,3} 黄建国^{1,2,3*}

¹中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; ²中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; ³中国科学院核心植物园, 广州 510650

摘 要 阿尔泰山的北方森林是中亚以及全球的生态系统的重要组成部分, 其生长动态可以影响到全球范围的热辐射、碳平衡等。因此, 探究影响阿尔泰山树木径向生长的主要因素至关重要。该研究以新疆喀纳斯国家级自然保护区的西伯利亚五针松(*Pinus sibirica*)为研究对象, 建立西伯利亚五针松年表, 通过分析不同时间间隔累年生长量、竞争指数以及气候因子之间的关系, 运用线性混合效应模型、相关分析等方法, 探究竞争和气候对新疆阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的影响。结果表明: (1)线性混合效应模型结果显示竞争树胸径和与西伯利亚五针松过去30年的累年生长量之间的拟合效果最好; (2)标准年表与3月的平均气温、平均最高气温、平均最低气温之间有显著正相关关系; (3)累年生长量最高值出现在气温0–5 °C, 竞争指数低于100的时候。累年生长量最低时, 气温达到–10 °C, 竞争指数也超过了300。目标树的树木径向生长受到竞争树胸径和及生长季前期气温的影响, 两者共同作用。但相较于气候因子而言, 竞争对西伯利亚五针松的树木径向生长有更大的影响作用。

关键词 竞争; 径向生长; 气候; 西伯利亚五针松

康剑, 梁寒雪, 蒋少伟, 朱火星, 周鹏, 黄建国 (2020). 竞争和气候对新疆阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的影响. 植物生态学报, 44, 1195–1202. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0224

Effects of competition and climate on tree radial growth of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang, China

KANG Jian^{1,2,3}, LIANG Han-Xue^{1,3}, JIANG Shao-Wei^{1,2,3}, ZHU Huo-Xing^{1,3}, ZHOU Peng^{1,2,3}, and HUANG Jian-Guo^{1,2,3*}

¹Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; ²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and ³Core Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract

Aims As an important part of the ecosystems of Central Asia and the whole world, forest growth dynamics of the boreal forest in Altai Mountains can affect global thermal radiation, carbon balance and so on. Therefore, it is crucial to explore the main factors affecting tree radial growth of the boreal forest in Altai Mountains.

Methods We selected *Pinus sibirica* in Kanas National Nature Reserve of Xinjiang as the target tree species, and established tree-ring chronology of *P. sibirica*. To explore the influence of competition and climate on radial growth of *P. sibirica* in the Altai Mountains, Xinjiang, we analyzed the relationships among the cumulated basal area increment (*BAI*), competition index and climate factors at different time intervals by applying various methods like linear mixed effect model and correlation analysis.

Important findings The results of the linear mixed effect model showed that: (1) the *BAI* over the past 30 years can be best predicted by the sum of competitors' diameter at breast height (*SDBH*). (2) Significant positive correlations were found between the standard chronology, and mean air temperature, mean maximum air temperature and mean minimum air temperature in March. (3) The highest value of the cumulated *BAI* was observed when air temperature was from 0 to 5 °C, and the competition index was below 100. The lowest value of the cumulative growth occurs when air temperature reaches –10 °C and the competition index exceeds 300. Tree radial growth of subject trees was influenced by both the diameter at breast height of the competing trees and the

收稿日期Received: 2020-07-06 接受日期Accepted: 2020-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(41661144007、4171101346和41701047)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41661144007, 4171101346 and 41701047).

* 通信作者Corresponding author (huangjg@scbg.ac.cn)

early growing season air temperature. Competition plays a more important role in affecting radial growth of *P. sibirica* than climate factors in this area. Therefore, our results would provide a scientific basis for forest management of *P. sibirica* in Kanas National Nature Reserve of Xinjiang.

Key words competition; radial growth; climate; *Pinus sibirica*

Kang J, Liang HX, Jiang SW, Zhu HX, Zhou P, Huang JG (2020). Effects of competition and climate on tree radial growth of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 1195–1202. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0224

森林生态系统在全球碳循环中起着至关重要的作用(Pan *et al.*, 2011)。作为陆地生态系统中最大的生物群落之一, 北半球中高纬度的北方森林生态系统的动态发展对全球变化具有重要意义(Kerhoulas & Kane, 2012)。树木个体是森林生态系统的重要组成部分, 其生长除了受到自身遗传因素的影响, 还会受到诸多外界因素的影响(Kawata, 1997)。其中, 气候因子对于树木径向生长有显著的影响。水热条件的变化对北方森林树木径向生长的影响较大。研究发现蒙古中北部半干旱地区的西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚五针松(*Pinus sibirica*)、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)树木晚材的生长主要和当年的生长季气温相关(de Grandpré *et al.*, 2011)。尚华明等(2010)对哈萨克斯坦境内的阿尔泰山南坡西伯利亚落叶松研究发现, 树轮宽度与6月份气温显著正相关。伴随气候变化带来的降水增加, 中国西北部的祁连山区青海云杉(*Picea crassifolia*)的生长期延长, 其年径向生长量近年来明显增加(Gao *et al.*, 2018)。然而, 研究者通过对阿尔泰山中东部的西伯利亚落叶松进行树轮气候学研究, 发现西伯利亚落叶松生长量与当年6月降水量呈负相关关系(黄力平等, 2015)。

此外, 竞争也是影响树木径向生长量的一个重要因子, 主要表现为邻近树木对光、土壤营养等资源的竞争(王政权等, 2000)。目前, 已经开展了不少关于竞争对树木生长影响的研究。康雨昌等(2019)通过对小兴安岭的红松(*Pinus koraiensis*)研究发现, 竞争会加剧红松树轮生长与6月份降水响应的敏感性, 而对树轮生长与气温关系影响不显著。对呼伦贝尔沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)的研究发现, 竞争显著影响了该树种的树木生长, 同时不同竞争力的树木对气候因子的响应有差异(Kwon *et al.*, 2019)。此外, 研究还发现, 在凉水自然保护区的阔叶红松林中, 大径级树木的径向生长主要受地形因素的影响, 而小径级树木的径向生长主

要受到竞争的影响(韩大校和金光泽, 2017)。

尽管目前已经开展了针对气候、竞争与树木径向生长的研究, 并且发现水热条件是制约树木径向生长的重要因素, 同时树木个体间的竞争作用同样影响树木径向生长。但竞争和气候对于树木径向生长的相对贡献度并不清楚, 阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的主要限制因子还不明确。目前, 针对阿尔泰山西伯利亚五针松的径向生长与气候、竞争关系的研究还未见报道。

西伯利亚五针松是阿尔泰山北方森林的建群种之一, 其生长的动态变化对于阿尔泰山北方森林群落动态具有重要的影响作用。本文通过野外样方调查以及树轮学实验方法, 建立了样方的树轮年表, 并与4个主要的气候因子做相关分析, 分析影响西伯利亚五针松径向生长的主要气候限制因子。通过计算样方中目标树的竞争指数及其不同时间尺度的累年断面积生长量, 运用模型拟合的方法, 分析竞争、气候对树木生长的影响。从而判断竞争与气候对西伯利亚五针松树木径向生长的相对贡献度, 确定该树种径向生长受到的主要限制因素。该研究有助于揭示影响该地区西伯利亚五针松树木生长的机制, 为该区域实施更加积极有效的森林管理措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域

研究区位于新疆阿勒泰地区北部阿尔泰山区的喀纳斯国家级自然保护区, 西面和北面越阿尔泰山脉山脊线与哈萨克斯坦、俄罗斯接壤, 东邻蒙古国。该地区属于典型的温带大陆性气候, 冬季寒冷且漫长。研究区年平均气温 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年降水量 $1\,065.4\text{ mm}$ (刘博等, 2019)。土壤主要以山地棕色针叶林土、高山草甸土等为主。由于特殊的地理条件, 研究区内森林、草原、草甸相间交错呈垂直分布。喀纳斯的山地森林是北方针叶林地带在我国的典型代表, 主要有西伯利亚落叶松、西伯利亚云杉(*Picea obovata*)、

西伯利亚五针松和西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*)等建群种(刘博等, 2019)。

1.2 样本采集

西伯利亚五针松喜湿, 经常与西伯利亚冷杉、西伯利亚云杉等树种形成混交林(de Grandpré *et al.*, 2011)。2017年7月于研究区(48.73° N, 87.03° E)海拔1 384 m的位置的混交林(优势树种为西伯利亚五针松)中选取了一个样地, 样地大小为20 m × 30 m, 样地所有树木的平均树高18.3 m, 平均胸径17.7 cm。样地的立木密度为1 183株·hm⁻², 除了西伯利亚五针松, 样地内还有西伯利亚落叶松、垂枝桦(*Betula pendula*)等伴生树种, 样地坡向为西, 土壤类型主要为山地棕色针叶林土, 林下以低矮灌木和草本为主。样地中共选取13株目标树, 用生长锥在每株树木胸径处(树高1.3 m处)从平行于所在坡面的两个不同方向分别钻取一个样芯, 封装于塑料管中带回实验室, 测量样方中的所有树的胸径、树高等指标。

1.3 气象数据

本文所采用的气候数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>), 国家气象站哈巴河气象站(48.05° N, 86.35° E)。气候指标包括月平均气温(T)、月平均最低气温(T_{\min})、月平均最高气温(T_{\max})、月降水量(P)等(图1), 数据长度为1958–2017年。除当年数据外, 还选择了上一年8–12月的上述气候指标作为分析对象。

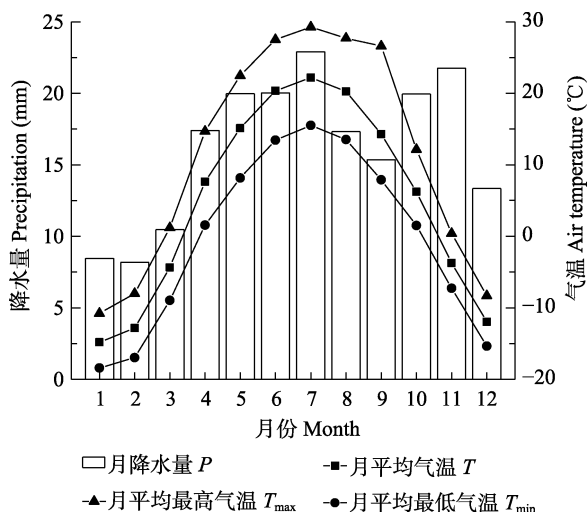


图1 新疆阿尔泰山研究区1958–2017年月平均气温、月平均最低气温、月平均最高气温和月降水量的变化趋势。

Fig. 1 Variation trend of monthly mean air temperature (T), monthly mean minimum air temperature (T_{\min}), monthly mean maximum temperature (T_{\max}) and monthly precipitation (P) in the research area of Altai Mountains, Xinjiang from 1958 to 2017.

1.4 竞争指数

以每株目标树为中心, 将其半径4 m范围内的所有立木作为竞争树, 测量并记录所有树的胸径(Zou *et al.*, 2015)。利用公式计算以下3种竞争指数用来表征目标树受到的竞争强度(Stadt *et al.*, 2007)。包括竞争树密度(N , 株·hm⁻²)、竞争树胸径和($SDBH$, m·hm⁻²)、竞争树胸高断面积和(SBA , m²·hm⁻²) (Huang *et al.*, 2013)。单木竞争指数公式为:

$$CI = \frac{m}{A} \sum_{j=1}^{nj} (DBH_j)^k$$

式中, CI 表示竞争指数; A 表示竞争树所在的区域面积, 本研究中 A 的值为0.005; n 表示竞争树的个体数; j 表示竞争树的编号; DBH_j 表示第 j 株竞争树的胸径; k 是指数权重, 计算 N 时 $k=0$, 计算 $SDBH$ 时 $k=1$, 计算 SBA 时 $k=2$ 。

N 是以目标树为中心, 半径4 m范围内的所有立木(竞争树)的密度; $SDBH$ 是该范围内所有立木的胸径之和, 表征竞争树的粗细程度; SBA 是区域内所有立木的胸高断面积之和, 单位土地面积的胸高断面积的总和可以衡量其林分现存量。3种竞争指数都可以表示在一定范围内, 树木个体对光照、营养等资源的利用程度。

1.5 年表建立

采集的树轮样本在实验室经过固定、干燥、打磨等处理后, 利用树轮测量专业仪器LinTab树轮宽度测量仪及配套TSAP软件(LinTab 6.0, Frank Rinntech, Heidelberg, Germany)测量年轮宽度(精度为0.001 mm)。采用目视初步定年、骨架图定年等方式交叉定年, 确定每一轮的精确年份, 并使用COFFECHA程序检测交叉定年的准确度以及缺失轮判断的可靠性(Holmes, 1983)。通过ARSTAN程序, 运用截止频率为50%的平滑样条函数进行去趋势处理, 消除树龄及非气候因子所引起的树木生长波动, 形成样点的标准年表(STD)(Cook, 1985)。同时, 为了更好地评估年表的质量, 计算了部分参数, 包括平均敏感度(MS)、样本相关系数($rbar$)、信噪比(SNR)以及样本总体解释量(EPS)。

1.6 断面积生长量

通过测量的胸径、树皮厚度等指标, 运用R软件中的“dplR”包(Bunn, 2008), 计算目标树的断面积生长量(BAI)。同时, 分别计算每株目标树不同时间间隔(5、10、15、20、25、30年)的累积断面积生长量。

1.7 数据分析

由于目标树随着时间的推移而不断增长,它与竞争树之间的相对竞争压力是恒定的。因此,当前的竞争指数可用于模拟不同时间间隔的目标树径向生长。将不同时间间隔的断面积生长量作为因变量,竞争指数作为自变量,目标树的胸径(*DBH*)大小(*DBH* > 30 cm为大径级,反之为小径级)作为随机效应,运用线性混合效应模型(LMM),进行模型拟合。模型表示如下:

$$BAI = a + b \times CI + \varepsilon$$

式中, *CI*表示竞争指数; *a*和*b*是固定效应; ε 是随机效应。线性混合效应模型使用R中的“nlme”包进行拟合。使用“MuMIn”包(Barton, 2009)计算 R^2 (临界 R^2 和条件 R^2)进行模型评价。

运用R “treeclim”包(Zang & Biondi, 2015)对年表与气候因子之间的Pearson系数进行分析,该函数根据年轮年表与每月的气候数据计算响应和相关系数,同时在Bootstrap重采样分析中获得显著性检验结果。

2 结果和分析

2.1 年表及竞争指数特征

由于单木不具有年表的特征值,因此,本研究计算的是西伯利亚五针松的树种年表统计值(表1)。结果显示,年表长度为209年(1808–2017)。*MS*为0.19,说明西伯利亚五针松对该区域气候敏感。其中,树轮年表的可靠区间为1958–2017年,年表的标准偏差为0.30,标准偏差是反映树轮年表所包含气候信息量多少的统计参数(李宗善等, 2011),说明年表包含的气候信息量较多。此外,年表的*SNR*也较大,表明年表中用于分析的环境信息量较大。样本总体解释量的数值为0.93,远高于0.85的临界值(Wigley *et al.*, 1984),说明采集的样本量中的信号可以代表总

体特征。

将目标树、竞争树的*DBH*代入公式,计算样地中目标树的3种竞争指数(表2)。竞争树的密度在800–1 800株·hm⁻²之间,其中,9号目标树的值最高为1 800株·hm⁻²。*SDBH*分布在69.8–369.4 m·hm⁻²之间,其中2号目标树的值最高为369.4 m·hm⁻²,6、13号目标树的值均低于100 m·hm⁻²。2号目标树的*SBA*最高为97.5 m²·hm⁻²,6、13号目标树的相对较低。

2.2 竞争与累积断面积生长量的关系

对不同时间间隔的累积断面积生长量与不同的竞争指数进行线性混合效应模型的拟合,结果见表3。结果表明,过去15、20、25、30年的累积断面积生长量与竞争指数的模型 R^2 较高。其中,*SDBH*与累积断面积生长量的拟合参数最高。过去30年的累积断面积生长量与*SDBH*之间的模型拟合效果最佳,且其临界 R^2 达到0.22,条件 R^2 为0.62。

2.3 气候对树木径向生长的影响

通过对西伯利亚五针松的年表与气候因子(公共区间1959–2017)做相关分析,结果发现,树木径向生长与当年3月的平均气温($r = 0.32, p < 0.05$)、平均最高气温($r = 0.30, p < 0.05$)、平均最低气温($r = 0.33, p < 0.05$)均呈显著正相关关系。但同时也发现,研究区的降水量与树木径向生长之间没有显著的相关关系(图2)。

2.4 竞争与气候的共同作用

研究发现,*SDBH*与3月的气温是影响树木径向生长量的重要因素。通过对*SDBH*、3月的气温、累年生长量之间的关系进行模型拟合。曲面模型的结果(图3)显示,累年生长量最高值出现在气温0–5 °C,竞争指数低于100的时候。累年生长量最低时,气温达到–10 °C,竞争指数也超过了300。气温越稳定,竞争指数越高,累年生长量越低。而当竞争指数小

表1 新疆阿尔泰山西伯利亚五针松的标准年表主要特征参数

Table 1 Main characteristic parameters of the standard chronology of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang

年表长度 Chronology length	平均敏感度 Mean sensitivity	标准偏差 Standard deviation	样本相关系数 Correlation coefficient for all series	信噪比 Signal-to-noise ratio	样本总体解释量 Expressed population signal
1808–2017	0.19	0.30	0.24	13.30	0.93

表2 新疆阿尔泰山西伯利亚五针松竞争指数特征参数

Table 2 Characteristic parameters of competitive indices of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang

竞争树密度(株·hm ⁻²) <i>N</i> (individual·hm ⁻²)			竞争树胸径和 <i>SDBH</i> (m·hm ⁻²)			竞争树胸高断面积和 <i>SBA</i> (m ² ·hm ⁻²)		
最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min
1 800	1 153	800	369.4	206.7	69.8	97.5	41.3	10.8

N, density of competitors; *SBA*, sum of competitors' stand basal area; *SDBH*, sum of competitors' diameter at breast height.

表3 新疆阿尔泰山西伯利亚五针松竞争指数与累积断面面积生长量的线性混合效应模型结果

Table 3 Results of the linear mixed-effects models of competitive indices and cumulated basal area increments of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang

时间间隔 Time interval (a)	竞争指数 Competition indices	<i>a</i>	<i>b</i>	临界 R^2 Marginal R^2	条件 R^2 Conditional R^2
5	<i>N</i>	0.098 3	0.000 0	0.09	0.59
	<i>SDBH</i>	0.082 9	-0.000 1	0.12	0.6
	<i>SBA</i>	0.072 0	-0.000 4	0.08	0.52
10	<i>N</i>	0.204 5	-0.000 1	0.12	0.57
	<i>SDBH</i>	0.169 1	-0.000 3	0.16	0.59
	<i>SBA</i>	0.145 0	-0.000 9	0.11	0.49
15	<i>N</i>	0.328 1	-0.000 1	0.15	0.58
	<i>SDBH</i>	0.265 7	-0.000 5	0.20	0.60
	<i>SBA</i>	0.226 7	-0.001 4	0.14	0.49
20	<i>N</i>	0.409 0	-0.000 2	0.13	0.52
	<i>SDBH</i>	0.338 6	-0.000 6	0.18	0.55
	<i>SBA</i>	0.290 6	-0.001 9	0.13	0.46
25	<i>N</i>	0.486 2	-0.000 2	0.13	0.51
	<i>SDBH</i>	0.404 9	-0.000 7	0.18	0.54
	<i>SBA</i>	0.349 4	-0.002 2	0.14	0.45
30	<i>N</i>	0.578 1	-0.000 2	0.15	0.47
	<i>SDBH</i>	0.484 7	-0.000 9	0.22	0.62
	<i>SBA</i>	0.416 5	-0.002 8	0.17	0.41

a, *b*, 混合效应中的固定效应参数。加粗部分为拟合效果好的混合效应模型结果。*N*, 竞争树密度; *SBA*, 竞争树胸高断面面积和; *SDBH*, 竞争树胸径和。

a, *b*, fixed effect parameters in the mixed effect model. Bold parts are the results of mixed effect model with good fitting effect. *N*, density of competitors; *SBA*, sum of competitors' stand basal area; *SDBH*, sum of competitors' diameter at breast height.

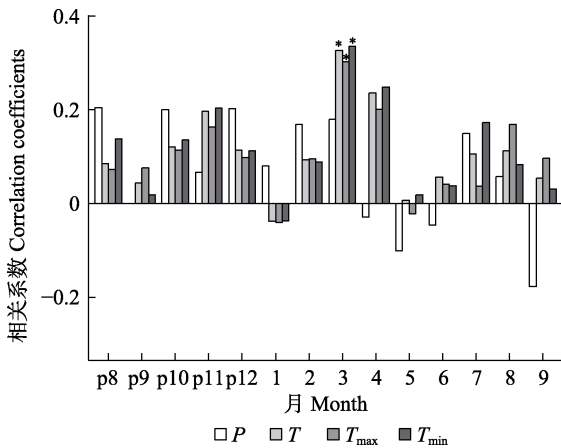


图2 西伯利亚五针松树轮宽度年表与月气候因子的相关性。p8-p12表示上一年8-12月份。P, 月降水量; T, 月平均气温; T_{max}, 月平均最高气温; T_{min}, 月平均最低气温。*, $p < 0.05$ 。

Fig. 2 Correlation between ring width chronology of *Pinus sibirica* and monthly climate factors. p8-p12 represents August to December of the previous year. P, monthly precipitation; T, monthly mean air temperature; T_{max}, monthly mean maximum air temperature; T_{min}, monthly mean minimum air temperature. * $p < 0.05$.

于200时, 累年生长量随气温的升高而增加。模型检验结果表明, $R^2 = 0.21$, $p < 0.05$, 模型拟合效果较好。

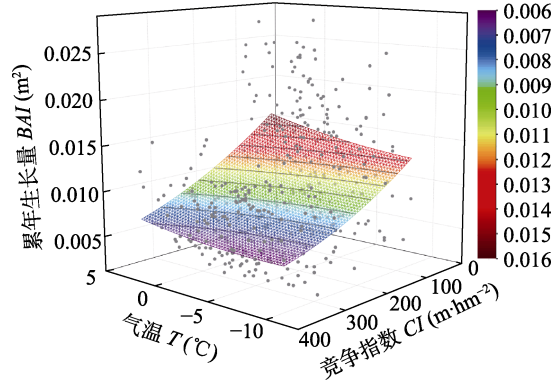


图3 新疆阿尔泰山西伯利亚五针松累年生长量与气温、竞争指数的关系。

Fig. 3 Relationship between cumulated basal area increments (BAI) of *Pinus sibirica* in Altai Mountains, Xinjiang and air temperature (*T*) and competition index (*CI*).

3 讨论

3.1 竞争对树木生长的影响

结果表明, 混合效应模型在过去15-30年的拟合效果更好。该结果与其他区域的研究结果具有一致性。研究发现, 中国亚热带地区的马尾松(*Pinus massoniana*)的生长量在15-25年时与竞争指数的拟合效果较好, 其中, 过去20年的生长量与竞争指数的模型拟合最佳(Liang *et al.*, 2019)。在加拿大西部的研究中也类似的结果, 研究发现该区域的山杨(*Populus tremuloides*)的生长量在过去10-25年尺度上与竞争指数达到模型拟合效果最优(Huang *et al.*, 2013)。本研究中的西伯利亚五针松是暗针叶林的主要建群种, 其生长寿命可达400年以上, 径向生长的速生期在50-120年, 连年生长量的最高值出现在90年, 且树木生长的前50年是生长缓慢期(但新球和洪加凤, 1993)。在15-30年这个区间内, 西伯利亚五针松为幼龄林时期, 还处在林冠遮阴阶段, 营养空间较小、生长缓慢(但新球和洪加凤, 1993)。此前的研究表明, 目标树的径级越大, 其对竞争的敏感度会越低(Gómez-Aparicio *et al.*, 2011)。因此, 15-30年的树木径向生长量对于竞争有着更强的敏感性。

模型拟合效果较好的时间区间(15-30年), *SDBH*对于树木累年生长量的拟合度最高, 说明西伯利亚五针松的生长受到竞争树粗细的显著影响。*SDBH*可以表示在一定范围内竞争树对生长资源的利用程度, 包括光照、土壤养分等资源。树木通过获取更多的资源, 有助于促进其个体生长。例如, 充

足的光照可以有效促进树木进行光合作用,进而有利于有机物质的积累。同时,树木为了获得更多的资源,其高生长和径向生长往往随着对生长资源利用程度的改变而变化(马士友, 2016)。而在过去15–30年间, *SDBH*始终是生长量的主要影响因子。这可能是由于伴随着目标树的生长,竞争树也在随之生长,两者之间有着相对恒定的竞争压力(Liang *et al.*, 2019)。

3.2 树木径向生长的限制气候因子

西伯利亚红松的树木径向生长主要受到3月份气温的促进作用,这一结果与同在喀纳斯保护区开展的西伯利亚五针松径向生长与气候因子关系的研究结果一致(Shah, 2019)。但与阿尔泰山其他区域的研究结果不一致。阿尔泰山中部的西伯利亚五针松与气候的响应研究表明,6月份气温对树木径向生长起直接作用(Kharuk *et al.*, 2009; Nikolaeva *et al.*, 2015)。在俄罗斯境内阿尔泰山的研究发现,西伯利亚五针松的树木径向生长主要受到3月降水量和7月气温的积极影响(康剑等, 2020)。造成研究结果不一致的原因可能是小气候环境的差异所导致的。阿尔泰山由于地处温带与北寒带的过渡地带,且山脉地形复杂多变,其南北两侧气候差异较大(Sidorova *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2018)。本研究区域位于中国境内的阿尔泰山区域,属于阿尔泰山中段南坡,因此,局部区域的小气候环境与其他区域存在差异。3月正值早春季节,为树木的生长季前期,此时研究区寒冷且多积雪,土壤冻结,不利于树木根系的吸收与活动。因此,气温升高有利于土壤解冻,同时导致融雪发生,从而加快树木根系开始恢复生理活动,进而促进树木径向生长(于大炮等, 2005)。

前人研究结果表明,水热条件的变化是影响树木径向生长的主要因素。研究发现西伯利亚云杉树木径向生长主要受到上一年7月至当年6月这12个月的降水量影响(Chen *et al.*, 2014)。对蒙古境内的阿尔泰山研究发现,生长季降水增加对西伯利亚落叶松的径向生长有明显促进作用(Dulamsuren *et al.*, 2014)。不同于研究区域的其余树种,西伯利亚五针松的树木径向生长并未受到水分的限制。原因可能包括以下两个方面:其一,研究区域的降水量较高,土壤水分充足,该树种的树木径向生长不易受到降水的影响。其二,西伯利亚五针松属于温度敏感型树种,树种的生理特性决定了其受到水分的限制作

用不明显(康剑等, 2020)。

3.3 竞争与气候的作用

气候因子主要通过影响树木生理活动来影响其径向生长,竞争主要通过影响树木对生长资源的利用程度来影响其生长量,两者均对树木的生长产生显著影响,且两者往往相互作用,共同影响。气温高于0℃时,随着竞争指数的减小,树木生长量明显升高。可能是由于当气温处于适宜条件时,竞争指数减小,树木个体可以获得更多的生长资源。有研究表明林木竞争强度与胸径、树高、树冠比、树干、树枝、树叶和树根生物量呈显著幂函数关系(董利虎等, 2013)。而当气温低于0℃时,竞争指数的减小也会促使树木生长量显著上升。当竞争指数处于较低水平时,树木的生长量随着温度升高而增加,但增加幅度较小。气温的升高有利于植物进行光合作用,从而提供更多的营养物质,促进树木生长(Velisevich & Kozlov, 2006)。而竞争指数较大时,随着气温升高其生长量变化不明显。综上所述,竞争相对于气候因子对树木径向生长有着更大的影响作用。该结果与其他地区的研究结果一致。前人研究表明,竞争较气候而言是造成加拿大西部北方森林树木生长衰退的主要因素(Zhang *et al.*, 2015)。在我国亚热带地区,竞争也占据了主导地位,马尾松树木的径向生长主要受到竞争的影响(Liang *et al.*, 2019)。基于此,阿尔泰山西伯利亚五针松林在经营管理过程当中,管理者应该更加注重森林抚育,合理开展间伐、择伐等措施,确定适宜的采伐强度,优化竞争指数,从而有效提高林分生产力,促进林分健康可持续发展(宣海懂等, 2020)。

4 结论

本文通过研究不同时间间隔的累年生长量、不同竞争指数、气候因子、标准年表等的关系,探究竞争和气候对喀纳斯西伯利亚五针松的径向生长的影响。本研究结果表明,竞争树的胸径之和可以更好地预测新疆喀纳斯地区的西伯利亚五针松的树木生长量,生长季前的气温是该树种树木径向生长的限制气候因子。尽管竞争和气候共同作用于树木的径向生长,但研究区的西伯利亚五针松的树木径向生长主要受到竞争的影响。这些结果有助于了解该地区西伯利亚五针松生长的主要影响因子,对于该区域进行合理的森林管理措施具有重要的参考价值。

参考文献

- Barton K (2009). *MuMIn: Multi-Model Inference, R Package Version 0.12.0*. [2020-06-16]. <http://rforge.r-project.org/projects/mumin/>.
- Bunn AG (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 115–124.
- Chen F, Yuan YJ, Wei WS, Zhang TW, Shang HM, Zhang RB (2014). Precipitation reconstruction for the southern Altay Mountains (China) from tree rings of *Siberian spruce*, reveals recent wetting trend. *Dendrochronologia*, 32, 266–272.
- Cook ER (1985). *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*. PhD dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Dan XQ, Hong JF (1993). A preliminary survey of *Pinus sibirica* forests in Hanas Nature Reserve. *Forest Resources Management*, (2), 53–55. [但新球, 洪加凤 (1993). 哈纳斯自然保护区西伯利亚五针松林调查初报. 林业资源管理, (2), 53–55.]
- de Grandpré L, Tardif JC, Hessel A, Pederson N, Conciatori F, Green TR, Oyunsanaa B, Baatarbileg N (2011). Seasonal shift in the climate responses of *Pinus sibirica*, *Pinus sylvestris*, and *Larix sibirica* trees from semi-arid, north-central Mongolia. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, 1242–1255.
- Dong LH, Li FR, Jia WW (2013). Effects of tree competition on biomass and biomass models of *Pinus koraiensis* plantation. *Journal of Beijing Forestry University*, 35(6), 15–22. [董利虎, 李凤日, 贾炜玮 (2013). 林木竞争对红松人工林立木生物量影响及模型研究. 北京林业大学学报, 35(6), 15–22.]
- Dulamsuren C, Khishigjargal M, Leuschner C, Hauck M (2014). Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai. *Journal of Plant Ecology*, 7, 24–38.
- Gao LL, Gou XH, Deng Y, Wang ZQ, Gu F, Wang F (2018). Increased growth of Qinghai spruce in northwestern China during the recent warming hiatus. *Agricultural and Forest Meteorology*, 260–261, 9–16.
- Gómez-Aparicio L, García-Valdés R, Ruiz-Benito P, Zavala MA (2011). Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. *Global Change Biology*, 17, 2400–2414.
- Han DX, Jin GZ (2017). Influences of topography and competition on DBH growth in different growth stages in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest, north-eastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(1), 9–19. [韩大校, 金光泽 (2017). 地形和竞争对典型阔叶红松林不同生长阶段树木胸径生长的影响. 北京林业大学学报, 39(1), 9–19.]
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- Huang JG, Stadt KJ, Dawson A, Comeau PG (2013). Modelling growth-competition relationships in trembling aspen and white spruce mixed boreal forests of Western Canada. *PLOS ONE*, 8, e77607. DOI: 10.1371/journal.pone.0077607.
- Huang LP, Gao YQ, Li Y, Zhang TW, Hu DY, Wang L (2015). Growth of Siberia larch in the middle east of Altay Mountains and its response to climate change. *Arid Land Geography*, 38, 1169–1178. [黄力平, 高亚琪, 李云, 张同文, 胡东宇, 王蕾 (2015). 阿尔泰山中东部西伯利亚落叶松生长量及其对气候变化的响应研究. 干旱区地理, 38, 1169–1178.]
- Kang J, Jiang SW, Huang JG (2020). Radial growth response of four dominant tree species to climate factors in the Sayan Range of the Altai Mountains, Russia. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 6135–6146. [康剑, 蒋少伟, 黄建国 (2020). 阿尔泰山萨彦岭4种优势树种径向生长对气候因子的响应. 生态学报, 40, 6135–6146.]
- Kang YC, Liu BH, Ren JY, Tan KL (2019). Effect of competition on tree ring growth and climate factors of *Pinus koraiensis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 47(11), 6–10. [康雨昌, 刘滨辉, 任东宇, 谭凯亮 (2019). 竞争对红松树轮生长与气候因子关系的影响. 东北林业大学学报, 47(11), 6–10.]
- Kawata M (1997). Exploitative competition and ecological effective abundance. *Ecological Modelling*, 94, 125–137.
- Kerhoulas LP, Kane JM (2012). Sensitivity of ring growth and carbon allocation to climatic variation vary within ponderosa pine trees. *Tree Physiology*, 32, 14–23.
- Kharuk VI, Ranson KJ, Im ST, Dvinskaya ML (2009). Response of *Pinus sibirica* and *Larix sibirica* to climate change in southern Siberian alpine forest-tundra ecotone. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24, 130–139.
- Kwon S, Pan LL, Shi ZJ, Yang XH, Zhang X, Liu YS, Zhang KB (2019). Radial growth of Mongolian pine and its response to climate at different competition intensities. *Chinese Journal of Ecology*, 38, 1962–1972. [Kwon S, 潘磊磊, 时忠杰, 杨晓晖, 张晓, 刘艳书, 张克斌 (2019). 不同竞争强度下的沙地樟子松天然林树木径向生长及其气候响应. 生态学杂志, 38, 1962–1972.]
- Li ZS, Liu GH, Fu BJ, Zhang QB, Hu CJ, Luo SZ (2011). Influence of different detrending methods on climate signal in tree-ring chronologies in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 707–721. [李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政 (2011). 不同去趋势方法对树轮年表气候信号的影响——以卧龙地区为例. 植物生态学报, 35, 707–721.]
- Liang HX, Huang JG, Ma QQ, Li JY, Wang Z, Guo XL, Zhu HX, Jiang SW, Zhou P, Yu BY, Luo DW (2019).

DOI: 10.17521/cjpe.2020.0224

- Contributions of competition and climate on radial growth of *Pinus massoniana* in subtropics of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 274, 7–17.
- Liu B, Pan CD, Li GH, Yu GB, Zhang F, Guo K, Zou ZY (2019). Quantitative classification and sequencing of communities in pyrogenic succession of Kanas Taiga. *Ecology and Environmental Sciences*, 28, 1961–1973. [刘博, 潘存德, 李贵华, 余戈壁, 张帆, 郭珂, 邹卓颖 (2019). 喀纳斯泰加林火成演替群落数量分类与排序. 生态环境学报, 28, 1961–1973.]
- Ma SY (2016). *Research on the Response of Radial Growth to Thinning and Climatic Factors for Platycladus orientalis Plantation in Beijing*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [马士友 (2016). 北京地区侧柏人工林径向生长对采伐、气候因子的响应研究. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Nikolaeva SA, Savchuk DA, Bocharov AY (2015). Influence of different factors on tree growth of *Pinus sibirica* in the highlands of the central Altai Mountains. *Journal of Siberian Federal University Biology*, 8, 299–318.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang JY, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, McGuire AD, Piao SL, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988–993.
- Shah S (2019). *The Growth-climate Relationships and Potential Distribution of Siberian Pine (Pinus sibirica) in Northeast China*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [Shah S (2019). 西伯利亚红松生长与气候的关系及在中国东北地区的潜在分布. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Shang HM, Wei WS, Yuan YJ, Yu SL, Zhang TW, Aizemaiti W, Li XJ (2010). Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altai Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2246–2253. [尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 张同文, 瓦合提·艾则买提, 李新建 (2010). 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应. 生态学报, 30, 2246–2253.]
- Stadt KJ, Huston C, Coates KD, Feng ZL, Dale MRT, Lieffers VJ (2007). Evaluation of competition and light estimation indices for predicting diameter growth in mature boreal mixed forests. *Annals of Forest Science*, 64, 477–490.
- Sidorova OV, Saurer M, Myglan VS, Eichler A, Schwikowski M, Kirdeyanov AV, Bryukhanova MV, Gerasimova OV, Kalugin IA, Daryin AV, Siegwolf RTW (2012). A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Climate Dynamics*, 38, 175–188.
- Velisevich SN, Kozlov DS (2006). Effects of temperature and precipitation on radial growth of Siberian larch in ecotopes with optimal, insufficient, and excessive soil moistening. *Russian Journal of Ecology*, 37, 241–246.
- Wang ZQ, Wu GS, Wang JB (2000). Application of competition index in assessing intraspecific and interspecific spatial relations between Manchurian ash and dahurian larch. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 641–645. [王政权, 吴巩固, 王军邦 (2000). 利用竞争指数评价水曲柳落叶松种内种间空间竞争关系. 应用生态学报, 11, 641–645.]
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 201–213.
- Xuan HC, Guo MZ, Gao LS, Fan CY (2020). Effect of competition environment changes on the radial growth of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* in mixed coniferous-broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 4087–4093. [宣海幢, 郭梦昭, 高露双, 范春雨 (2020). 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, 40, 4087–4093.]
- Yu DP, Wang SZ, Tang LN, Dai LM, Wang QL, Wang SX (2005). Relationship between tree-ring chronology of *Larix olgensis* in Changbai Mountains and the climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16, 14–20. [于大炮, 王顺忠, 唐立娜, 代力民, 王庆礼, 王绍先. 长白山北坡落叶松年轮年表及其与气候变化的关系. 应用生态学报, 16, 14–20.]
- Zang C, Biondi F (2015). Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38, 431–436.
- Zhang DL, Feng ZD, Yang YP, Lan B, Ran M, Mu GJ (2018). Peat $\delta^{13}\text{C}$ cellulose-recorded wetting trend during the past 8000 years in the southern Altai Mountains, northern Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 156, 174–179.
- Zhang J, Huang S, He FL (2015). Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 4009–4014.
- Zou WT, Zeng WS, Zhang LJ, Zeng M (2015). Modeling crown biomass for four pine species in China. *Forests*, 6, 433–449.

特邀编委: 张齐兵 责任编辑: 李 敏