

DOI: 10.5846/stxb201908081665

康剑, 蒋少伟, 黄建国. 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, 2020, 40(17): 6135-6146.

Kang J, Jiang S W, Huang J G. Radial growth response of four dominant tree species to climate factors in the Sayan Range of the Altai Mountains, Russia. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6135-6146.

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

康 剑^{1,2,3}, 蒋少伟^{1,2,3}, 黄建国^{1,2,3,*}

1 中国科学院华南植物园, 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: 气候变化深刻地影响森林树木的生长, 而树种对气候变化敏感度的差异可能影响了气候变化下的森林生态系统响应。因此, 研究优势树种间生长对气候变化的敏感度差异, 对正确认识气候变化下林分生长动态及分布格局十分重要。基于树木年轮学的方法, 研究了阿尔泰山萨彦岭西伯利亚落叶松 (*Larix sibirica*)、西伯利亚红松 (*Pinus sibirica*)、西伯利亚冷杉 (*Abies sibirica*) 以及西伯利亚云杉 (*Picea obovata*) 4 种优势树种的径向生长-气候关系。结果显示: (1) 西伯利亚冷杉径向生长与上一年 10—11 月、当年 1—9 月的干旱指数、2—4 月的降水显著正相关, 与 1 月的平均温和最高温呈显著负相关关系, 与当年 4、6 月份的水汽压正相关; (2) 西伯利亚落叶松径向生长与上一年 8 月和当年 8 月的平均温、最高温以及当年 8 月的最低温显著负相关, 而与当年 6 月的最低温则正相关, 与 8 月份的水汽压显著负相关; (3) 西伯利亚红松径向生长与 3 月降水、7 月最低温、上一年 10 月的水汽压显著正相关; (4) 西伯利亚云杉径向生长与 6 月平均温、最高温、水汽压正相关, 与上一年 10—11 月、当年 2—4 月和 9 月的干旱指数正相关, 同时与 3、4 月的降水量显著正相关。西伯利亚冷杉和西伯利亚云杉、西伯利亚云杉和西伯利亚落叶松、西伯利亚云杉和西伯利亚红松对于特定气候因子表现出相似的响应结果, 与年表间相关性的结果一致。但差异也是明显的, 西伯利亚冷杉和西伯利亚云杉对区域水分变化敏感, 而西伯利亚落叶松和西伯利亚红松主要对区域温度变化敏感。综上所述, 气候变化下, 该区域优势树种对气候变化响应的差异可能导致区域林分动态和格局的改变, 因此, 多树种径向生长-气候关系研究有助于正确反映森林动态。研究结果可以为区域森林管理与生态保护工作提供理论依据。

关键词: 阿尔泰山萨彦岭; 4 种优势树种; 树木年轮; 气候; 径向生长

Radial growth response of four dominant tree species to climate factors in the Sayan Range of the Altai Mountains, Russia

KANG Jian^{1,2,3}, JIANG Shaowei^{1,2,3}, HUANG Jianguo^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Core Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Climate change has a profound impact on the growth of forest trees, and the sensitivity of different tree species to climate change may influence the response of forest ecosystem under climate change. Therefore, it is extremely important to study the differences in the growth sensitivity among dominant tree species to climate change, to correctly understand the growth dynamics and distribution pattern of tree species stand under climate change. Based on the standard method of

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目 (4171101346)

收稿日期: 2019-08-08; 网络出版日期: 2020-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangjg@scbg.ac.cn

dendrochronology, we selected the tree-ring width index of four dominant tree species, including *Larix sibirica*, *Pinus sibirica*, *Abies sibirica* and *Picea obovate* on the Sayan Range of the Altai Mountains, Russian. We focused on the characteristics of standard chronologies and the relationships between the standard chronologies and the six climatic factors. The results showed that (1) there was a significantly positive correlation between radial growth of *A. sibirica* and PDSI from October to November of the previous year and from January to September of the current year, precipitation from February to April, and the mean and maximum temperature in January. Additionally, vapour pressure in April and June of the current year was positively correlated with radial growth. (2) The radial growth of *L. Siberian* was negatively correlated with the mean temperature, maximum temperature, minimum temperature and vapour pressure in August of the current year, the mean temperature and maximum temperature in August of the previous year, and positively correlated with the minimum temperature in June. (3) The radial growth of *P. sibirica* was significantly and positively correlated with the precipitation in March and the minimum temperature in July, also the vapour pressure in last October. (4) The radial growth of *P. obovate* was positively correlated with the mean temperature, maximum temperature and mean vapor pressure in June, PDSI from October to November of previous year and from February to April and September of current year. Our findings showed that there were similar results of tree radial growth-climate factors between species. But there were differences between tree species that *A. sibirica* and *P. obovate* was sensitive to regional water, while *L. Siberian* and *P. sibirica* was mainly sensitive to regional temperature. The difference of the response of dominant tree species to climate change in this region may lead to the change of regional stand dynamics and pattern under climate change. Therefore, the research on radial growth-climate relationship of multiple tree species is helpful to correctly reflect the forest dynamics. The results of this study can provide theoretical basis for regional forest management and ecological protection.

Key Words: Sayan Range of the Altai Mountains; four dominant tree species; dendrochronology; climate; radial growth

近年来,全球变化趋势明显,人类活动导致的全球变暖比工业化前的水平高出 0.8—1.2℃ 之间。如果全球变暖继续以目前的速度增长,预计在 2030 年至 2052 年间,全球温度变暖增幅可能会达到 1.5℃^[1]。森林作为重要的碳汇,极易受到全球变化的影响。树木作为森林的组成元素,其生长除受其自身生理因素影响外,还与气候因子紧密相关。因此,气候变化对全球范围内的森林生态系统产生重要影响^[2],特别是作为全球最大生物群落之一的北方森林。研究气候变化背景下北方森林优势树种间径向生长-气候变化关系的差异,有助于反映森林生态系统动态发展,为森林生态管理与可持续发展提供科学依据。由于具有年分辨率高以及可靠性强的特点,树木年轮学成为研究气候变化条件下树木生长-气候关系的重要手段^[3]。

研究发现除了海拔、纬度等因子是影响树木生长-气候因子间关系的重要因素外,同一生境中不同树种的差异也会导致响应的分异^[4-9]。黄建国等通过对加拿大东部的北方森林中的 4 种主要树种研究发现,黑云杉 (*Picea mariana*) 和北美短叶松 (*Pinus banksiana*) 受到生长季温度的影响,而生长季前的降水对阔叶树种山杨 (*Populus tremuloides*)、北美白桦 (*Betula papyrifera*) 的生长有积极作用^[10]。张卫国等对玉龙雪山 3 个针叶树种对气候响应的研究发现,大果红杉 (*Larix potaninii*) 和长苞冷杉 (*Abies georgei*) 主要受到生长季温度、水分的限制,而丽江云杉 (*Picea likiangensis*) 则主要受限于生长季前的水热条件^[11]。王婷等通过对比油松和华山松年表与气候变化的相关关系,发现 2 个树种与温度、降水的响应发生在不同时期^[12]。上述研究结果表明,径向生长-气候变化关系在优势树种间存在差异。

阿尔泰山位于北半球的中高纬度地区,是中亚地区最大的山系之一,也是中亚气候变化的敏感区域,在全球气候变化研究中具有特殊地位^[13-14]。其森林生态系统被普遍认为是对气候变化响应最敏感的生态系统^[15]。阿尔泰山西萨彦岭地区森林覆盖广泛,为典型的北方森林,包括西伯利亚落叶松 (*L. sibirica*)、西伯利亚红松 (*P. sibirica*)、西伯利亚冷杉 (*A. sibirica*) 以及西伯利亚云杉 (*P. obovata*) 等优势种,且研究区域人为干扰较少,是研究气候变化-树木生长关系的理想区域。作为全球重要的生物多样性保护地区之一,该区域目前

已经开展了部分对树木径向生长-气候变化关系的研究,且发现树木径向生长主要受到温度、水分的影响^[16-17]。但目前还没有针对优势树种间响应的报道,而径向生长-气候关系在树种间的差异往往影响了气候变化下森林的响应。因此,研究优势树种间生长对气候变化的敏感度差异,对正确认识气候变化下林分生长动态及分布格局非常重要。本文通过测定阿尔泰山西萨彦岭的 4 种优势树种的树轮宽度数据,建立标准年表,对 76 年间(1940—2016)4 种优势树种与 6 个气候因子(平均温度(T)、最高温度(TMAX)、最低温度(TMIN)、降水(PCP)、干旱指数(PDSI)、水汽压(VAP))的响应做了深入分析,探究不同树种径向生长对气候的响应异同。该结果有助于完善该区域优势树种径向生长-气候变化关系,预测未来林分动态以及分布格局,旨在为我国“一带一路”战略的重要生态屏障保护提供科技支撑。

1 研究区域

研究区域为俄罗斯境内的西萨彦岭,属于阿尔泰山东支,位于蒙古高原的北沿、西伯利亚的南缘(42°N—53°N,93°E—94°E)(图 1)。该地区属于寒冷带常湿冷温气候,受到极地气旋和西伯利亚寒流的影响,夏季温暖相对较短,冬季严寒漫长^[18-19]。该区域年均气温-5.38℃,其中 7 月份月均温度最高,为 13.92℃;1 月份月均温度最低,为-27.17℃,1—4 月、10—12 月平均气温均为零下。年均总降水量 925.55 mm,且集中在 5—8 月,占全年总降水量的 50%(图 2)。研究区域的植被具有高度的垂直地带性,受地形影响,北部被大面积北方森林所覆盖。海拔 2200—2500 m 达到树线,树线以上则主要是灌木与亚高山草甸等植被类型^[20]。



图 1 研究区位置示意及样点位置

Fig.1 Study area location and sites location

RUABSI:西伯利亚冷杉样点,Russia *Abies sibirica*;RUPIOB:西伯利亚云杉样点,Russia *Picea obovata*;RUPISI:西伯利亚红松样点,Russia *Pinus sibirica*;RULASI:西伯利亚落叶松样点,Russia *Larix sibirica*

2 研究方法

2.1 样本采集

西伯利亚冷杉喜湿耐寒,多生长于阴坡半阴坡区域,常与西伯利亚落叶松或西伯利亚云杉等树种组成混交林^[21]。西伯利亚云杉耐寒耐阴,多为纯林,分布于海拔 1200—2400 m 范围内,是北方森林的重要建群种之

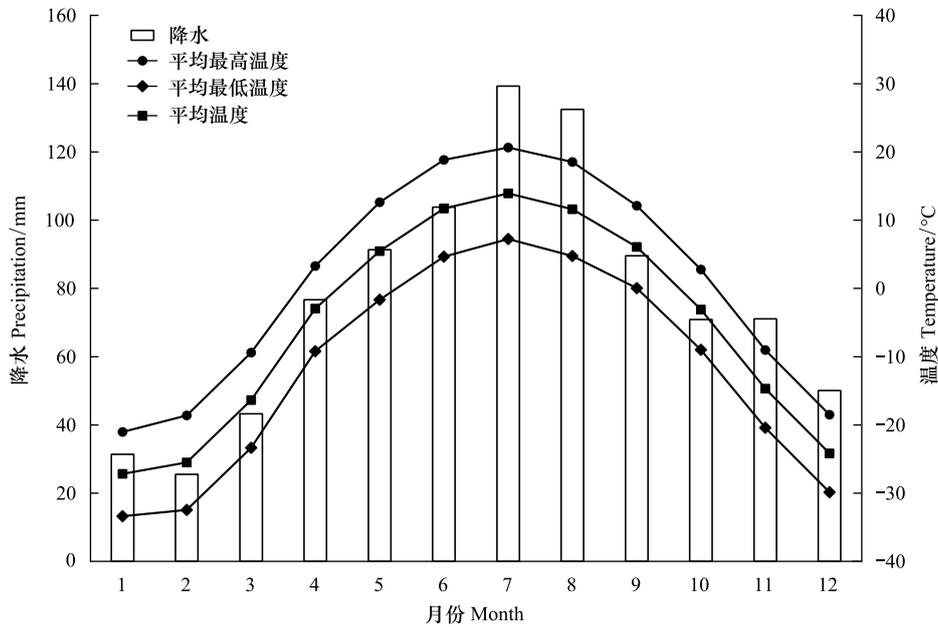


图2 研究区 1940—2016 年区间月平均气温、月平均最低气温、月平均最高气温和降水的变化趋势

Fig.2 The variation trend of monthly mean temperature, monthly mean minimum temperature, monthly mean maximum temperature and precipitation in the research area from 1940 to 2016

—^[22]。西伯利亚红松的生境与冷杉较为相似,同样不耐干旱^[23]。而西伯利亚落叶松为落叶针叶树种,该树种喜光,相对较为耐旱^[24](图 3)。研究区域内,分布有针叶树混交林,针阔叶混交林,此外还有部分以纯林形式存在。2017 年 7 月于研究区海拔 1200—1300 m 之间的区域内选取了 4 个样地,样地分别为各树种与疣枝桦(*Betula pendula*)组成的混交林,每个样地分别选择一个优势树种,并在每个样地中均设置 1 个 20 m×20 m 的无人干扰、未经过火灾、虫害等的林分作为样方,样方内有可采样的树木 15 株以上(表 1),样方内平均树木高度 22.5 m,平均胸径 35.7 cm,立木密度约为每公顷 1875 株。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。



图3 主要树种

Fig.3 Four dominant tree species

2.2 年表建立

采集的树轮样本在实验室经过干燥、固定、打磨等处理后,运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^[25]。运用 R 软件中的“dplR”包^[26],使用响应截止频率为 50%,级数长度 67%的样条函数对年表进行去趋势处理^[27],以消除与树龄有关的生长趋势及非气候因子所引起的树木生长波动,最终建立各树种的标准年表(STD, Standard chronology)(图 4)。同时,为了更好的评估年表的质量,计算了部分参数,包括平均敏感度(MS, Mean sensitivity)、一阶自回归系数(AR1, First-order serial autocorrelation)、样本相关系数(rbar, Correlation coefficient for all series)、第一主分量方差(PC1, Variance in first eigenvector)、信噪比(SNR, Signal-to-noise ratio)以及样本总体解释量(EPS, Expressed population signal)。

表 1 采样基本信息表

Table 1 Sample basic information table

样点 Site-plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	树/棵 Trees	样芯/个 Cores
RUABSI	93°18'E	52°49'N	1319	25	50
RUPIOB	93°57'E	52°41'N	1265	17	34
RUPISI	93°11'E	52°48'N	1287	20	40
RULASI	93°26'E	52°35'N	1199	20	40

RUABSI:西伯利亚冷杉样点,Russia *Abies sibirica*;RUPIOB:西伯利亚云杉样点,Russia *Picea obovata*;RUPISI:西伯利亚红松样点,Russia *Pinus sibirica*;RULASI:西伯利亚落叶松样点,Russia *Larix sibirica*

2.3 气象资料

所有样点均位于 CRU 规范的同一个人 0.5° × 0.5° 的格点当中,格点历史气象插值资料(主要为月资料)从 KNMI Climate Explorer 网站 CRU TS 4.02 下载(<https://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>),并整理用于后续统计分析。数据长度为 1940—2016 年,主要指标包括月平均温度(T)、月平均最低温度(TMIN)、月平均最高温度(TMAX)、月降水量(PCP)、水汽压(VAP)、帕尔默干旱指数(PDSI)^[28](PDSI 是土壤干旱程度的重要表征指数)。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。

2.4 数据分析

利用 R 软件,计算各年表的参数,运用 R 包“treeclim”对不同树种与气候因子之间的 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,所有图件使用 R、ArcMap 等软件制作^[29-30]。

3 结果与分析

3.1 4 种不同树种年表的特征分析

通过对研究区域 4 种优势树种树轮年表统计参数特征分析发现(表 2),年表序列长度的平均值为 215 年。平均敏感度(MS)较高,为 0.11—0.14,其中西伯利亚落叶松(LY)的 MS 最高为 0.14。一阶自回归系数(AR1)均较高,在 0.41—0.71 间。第一主分量方差(PC1)均在 34.8%以上,样本间相关系数均大于 0.30,信噪比(SNR)的数值除了西伯利亚落叶松外均保持在 18.77—19.26,表明年表中用于分析的环境信息量较大。样本总体解释量(EPS)的数值均高于 0.85 的临界值^[31]。因此,本研究建立的年表具有一定的敏感性,且包含了由气候产生的低频变化和树木生理滞后效应^[26],气候因子对树木径向生长影响较大,年表中含有较多的气候信息^[32],采集的样本量中的信号可以代表总体特征。

对 4 种树种的标准年表(1940—2016)间的相关分析发现,西伯利亚云杉与西伯利亚冷杉年表的相关性最高($r=0.68, P<0.05$),其次为西伯利亚云杉的年表与西伯利亚红松之间的相关性($r=0.65, P<0.05$),此外,西伯利亚云杉与西伯利亚落叶松的相关性也较高($r=0.47, P<0.05$),相关系数反映了采样点树种之间的生长一致性(图 5)。

表 2 4 种优势树种标准年表主要特征参数

Table 2 Main characteristic parameters of four dominant tree species' standard chronologies

树种 Species	西伯利亚冷杉 <i>A. sibirica</i>	西伯利亚落叶松 <i>L. sibirica</i>	西伯利亚红松 <i>P. sibirica</i>	西伯利亚云杉 <i>P. obovata</i>
年表长度 Chronology length	1829—2018	1928—2018	1713—2018	1753—2018
样本数量 Number of trees (radii)	25(47)	20(40)	20(40)	17(33)
平均敏感度(MS) Mean sensitivity	0.114	0.141	0.128	0.129
标准差(SD) Standard deviation	0.214	0.449	0.174	0.228
一阶自回归系数(AC1) First-order serial autocorrelation	0.713	0.406	0.526	0.558
公共区间 1940—2016				
样本相关系数 R1; Correlation coefficient for all series	0.319	0.3	0.322	0.369
第一主分量方差(PC1) Variance in first eigenvector/%	34.8	37	34.9	39.6
信噪比(SNR) Signal-to-noise ratio	18.767	8.133	18.98	19.258
样本总体解释量(EPS) Expressed population signal	0.949	0.891	0.95	0.951

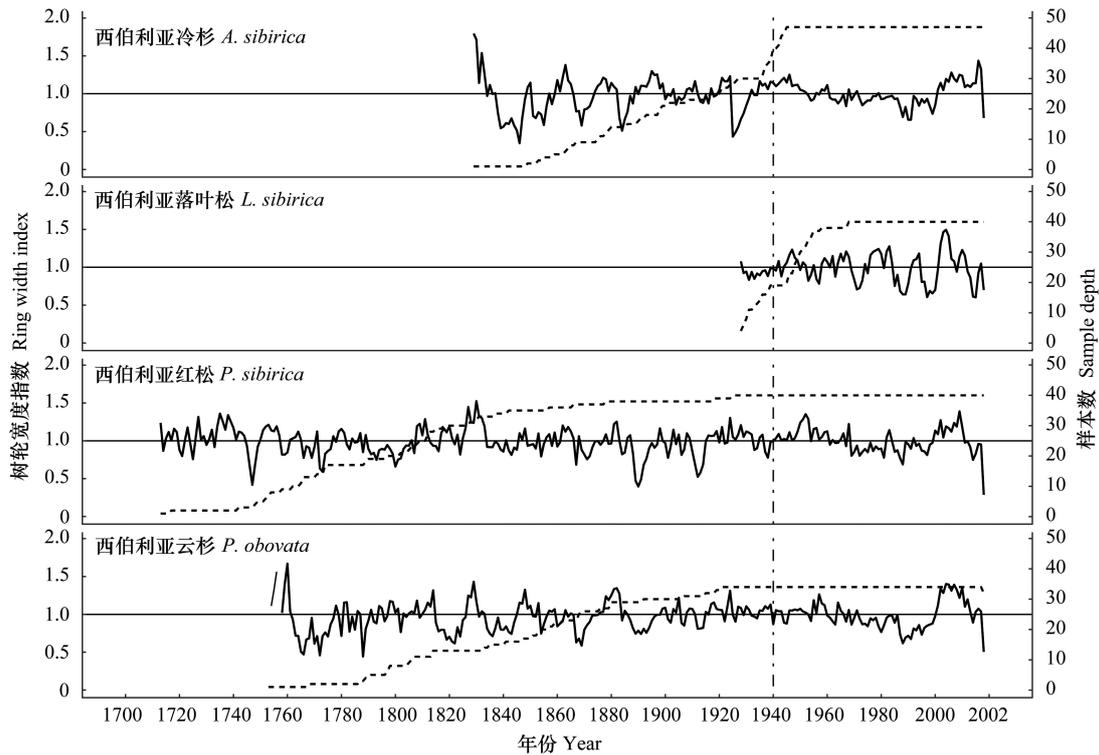


图 4 4 种优势树种的标准年表和样本量

Fig.4 Standard chronologies and sample size of four dominant species

3.2 4 种优势树种对气候因子的响应

通过对 4 种树种年表分别与 6 个气候因子做相关分析发现, 4 种优势树种径向生长的限制因子不尽相同。其中, 西伯利亚冷杉的径向生长与 2—4 月(生长季前期) ($r=0.20, r=0.23, r=0.33; P<0.05$) 的降水量(PCP) 显著正相关, 与干旱指数(PDSI) 有着很强的相关性, 表现为上一年的 10、11 月 ($r=0.25, r=0.30; P<0.05$)、当年 1—9 月 ($r=0.25—0.43, P<0.05$) 该树种的径向生长与干旱指数呈显著正相关。当年 1 月份的平均温度(T)、最高温度(TMAX) 与径向生长有显著负相关关系 ($r=-0.16, r=-0.16; P<0.05$)。此外, 当年 4、6 月的水汽压(VAP) 与径向生长显著正相关 ($r=0.27, r=0.26; P<0.05$) (图 6)。

西伯利亚落叶松的径向生长与降水量的相关性未达到显著性水平, 但与上一年 8、9 月的干旱指数显著负

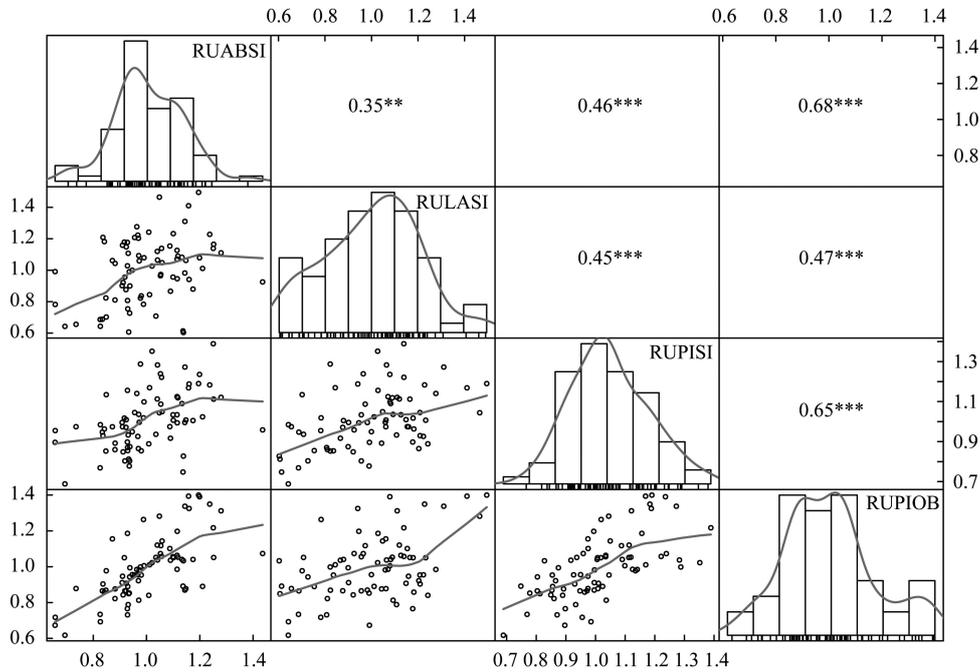


图5 4种优势树种的标准年表的相关性(1940—2016)

Fig.5 Correlation of standard chronologies of four dominant species in common period from 1940 to 2016

RUABSI:西伯利亚冷杉样点, Russia *Abies sibirica*; RUPIOB:西伯利亚云杉样点, Russia *Picea obovata*; RUPISI:西伯利亚红松样点, Russia *Pinus sibirica*; RULASI:西伯利亚落叶松样点, Russia *Larix sibirica*

相关($r=-0.25, r=-0.15; P<0.05$)。此外,落叶松生长对温度的响应较为明显,其中上一年8月和当年8月的平均温($r=-0.11, r=-0.19; P<0.05$)与径向生长显著负相关,当年8月的平均最高温也表现相同的响应($r=-0.19, P<0.05$),上一年8月和当年8月的平均最低温(TMIN)与径向生长显著负相关($r=-0.14, r=-0.16; P<0.05$),而在当年6月则呈现显著正相关($r=0.23, P<0.05$)。水汽压在当年8月的值也显示与落叶松径向生长显著负相关($r=-0.13, P<0.05$)(图7)。

4种树种当中,西伯利亚红松径向生长与气候因子的相关性较低,仅与当年3月降水、当年7月平均最低温、上一年10月的水汽压存在显著正相关的关系($r=0.24, r=0.25, r=0.20; P<0.05$)(图8)。

西伯利亚云杉的径向生长与当年3、4月的降水量显著正相关($r=0.23, r=0.21; P<0.05$),与上一年10—11月、当年2—4、9月的干旱指数有显著正相关关系($r=0.24—0.31; P<0.05$)。在温度响应方面,与6月的平均温、平均最高温都有显著正相关关系($r=0.32, r=0.33; P<0.05$)。此外,该树种径向生长还与上一年10月、当年6月的水汽压显著正相关($r=0.25, r=0.39; P<0.05$)(图9)。

4 讨论

研究结果充分表明,对于同一气候条件下,西伯利亚冷杉与西伯利亚云杉均与干旱指数有正响应关系,6月份温度对于西伯利亚云杉和西伯利亚落叶松有着相似的正响应,西伯利亚云杉与西伯利亚红松均受到生长季前的降水影响。这可能是由于在大环境下,树种的径向生长在特定方面产生的一致性信号,树种年表间的相关性分析结果与上述的树种间径向生长-气候关系的共性是一致的。但是,不同的树种径向生长-气候因子的关系也存在差异,包括对同一气候因子的响应方式、响应时间、响应程度等方面都存在一定的差异,这种差异可能来自于不同树种的生理特征以及遗传差异。

西伯利亚冷杉的径向生长与2—4月降水量显著正相关,与上一年10、11月和当年1—9月干旱指数显著正相关,而与1月温度显著负相关,该结果说明该区域西伯利亚冷杉径向生长主要受到干旱限制,为干旱敏感

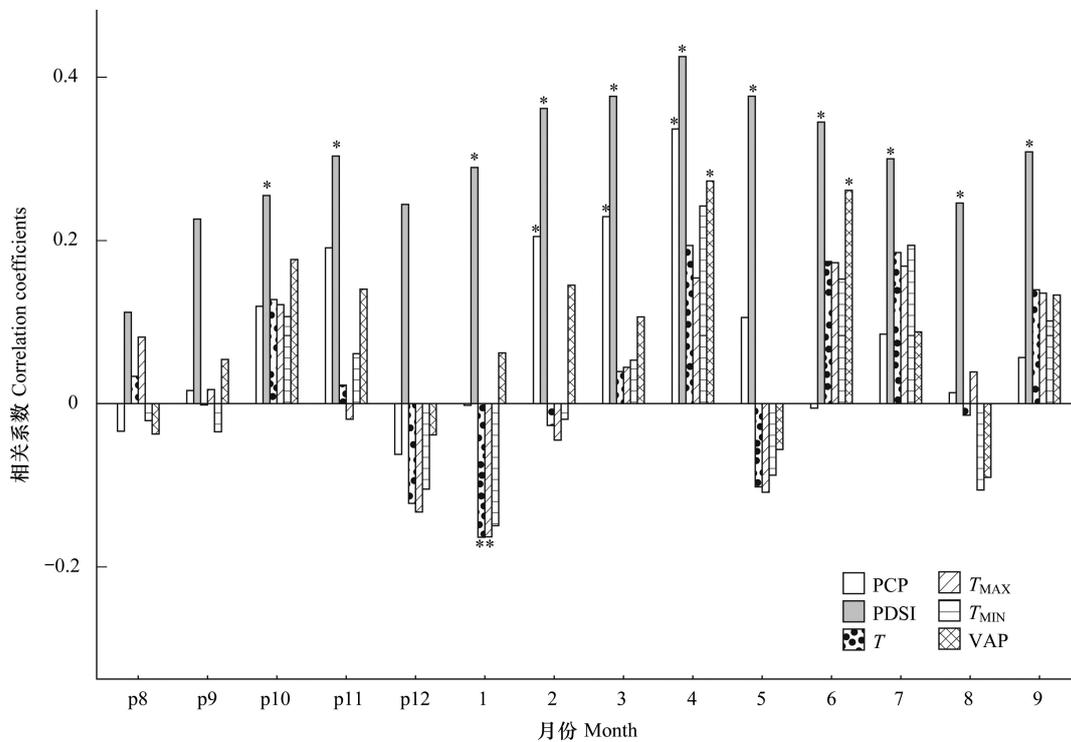


图6 西伯利亚冷杉树轮宽度年表(1940—2016年)与月气候因子的相关性

Fig.6 Correlation between ring width chronology of *Abies sibirica* (1940—2016) and monthly climate factors

p8—p12表示上一年8—12月份,*表示达到0.05水平的显著相关;PCP:降水,Precipitation;PDSI:干旱指数,Palmer Drought Severity Index; T:温度, Temperature; TMAX,最高温度, Maximum temperature; TMIN:最低温度, Minimum temperature; VAP:水汽压, Vapour pressure

树种。生长季前期的降雪增加,有利于对根部的保温^[12],同时,这一期间的降雪融化是生长季前期细胞水分的主要来源,充足的水分可以促进径向生长^[33]。植物生长需要不断通过根部从土壤吸收充足的水分来维持生理活动,冷杉属于喜湿树种,其生长极易受到干旱的限制^[34]。生长季前期,树木正处于休眠期,过高的温度会导致树木消耗增加,不利于树木生长期前期的物质积累,影响到即将到来的生长旺盛期。研究区降水在4月份开始逐渐增加,而此时植物还处于水分胁迫的状态,此时水汽压力的增大并不会抑制叶片的气孔活动,反而有助于缓解水分胁迫带来的压力。

而西伯利亚落叶松则表现不同,其生长主要受温度的影响,主要与8月的温度、水汽压显著负相关,而与6月平均最低温正相关。该区域落叶松的生长季在6—8月之间,10月落叶,6月为树木萌发新叶、快速发育的初期,由于此时融雪、降雨都在增加,水分充足,温度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,该结果与此前在阿尔泰山关于落叶松的研究一致^[35-37]。生长季末期,由于降水量依旧较大,8月温度的升高会导致空气湿度增加,使得叶片气孔关闭,光合作用减弱,进一步影响树木生长^[38]。

树种生物学特征的不同,对气候变化的响应特征以及敏感性强弱也有一定的差异^[39]。西伯利亚红松与气候因子的响应较弱,其生长受到3月降水、7月平均最低温的显著正影响。在树木生长季前期,气温整体较低,而较多的降雪可以有效的保护土壤温度,从而降低低温对根系的损伤。而生长季旺盛时期,温度的上升能有效促进酶活,提高植物光合作用速率,从而有利于树木径向生长。而有关于阿尔泰山中部的西伯利亚红松与气候变化的响应研究表明,6月份温度对树木径向生长起直接作用^[40-42]。本研究结果与该研究结果不完全一致,可能是由于局部区域的气候差异所导致的。

西伯利亚云杉生长与当年3—4月的降水量,上一年10—11月、当年2—4、9月的干旱指数正相关,与6月的平均温度、平均最高温度、水汽压显著正相关。该结果与新疆阿尔泰山的西伯利亚云杉生长与生长季温

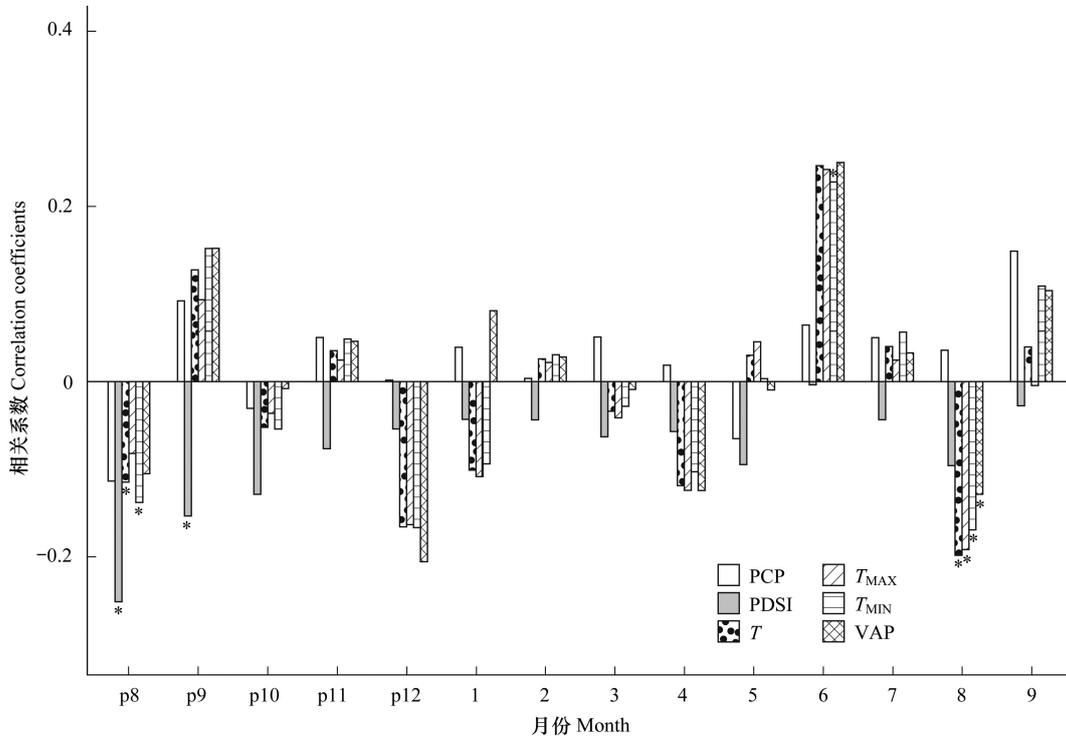


图 7 西伯利亚落叶松树轮宽度年表(1940—2016 年)与月气候因子的相关性

Fig.7 Correlation between ring width chronology of *Larix sibirica* (1940—2016) and monthly climate factors

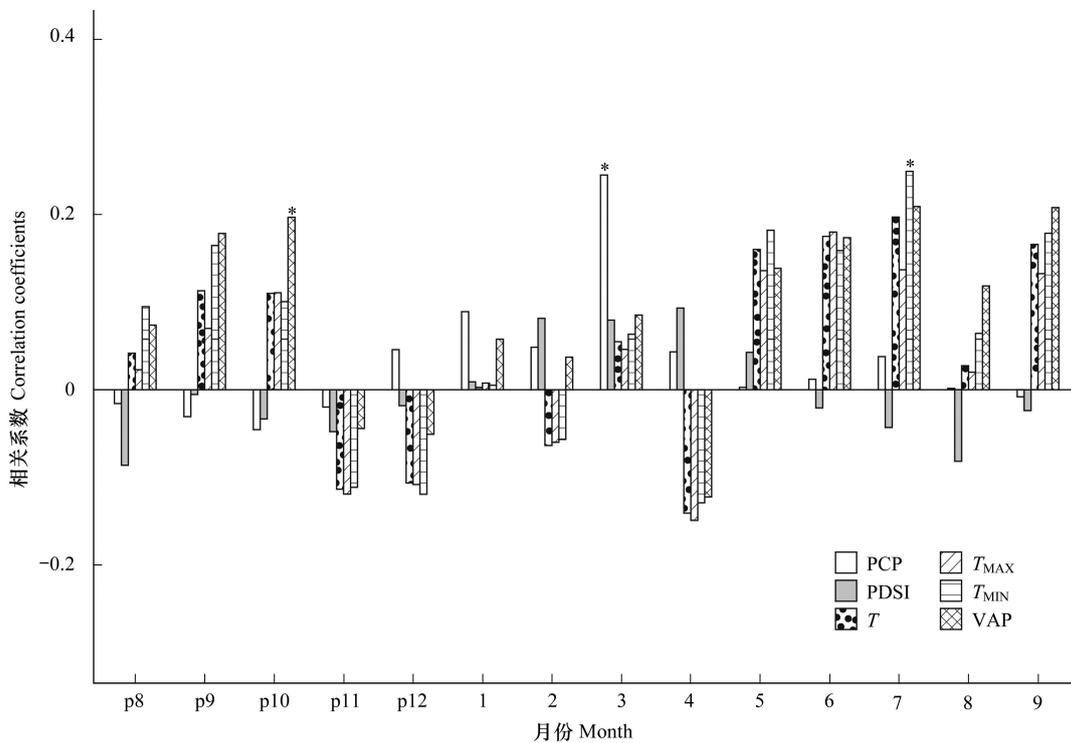


图 8 西伯利亚红松树轮宽度年表(1940—2016 年)与月气候因子的相关性

Fig.8 Correlation between ring width chronology of *Pinus sibirica* (1940—2016) and monthly climate factors

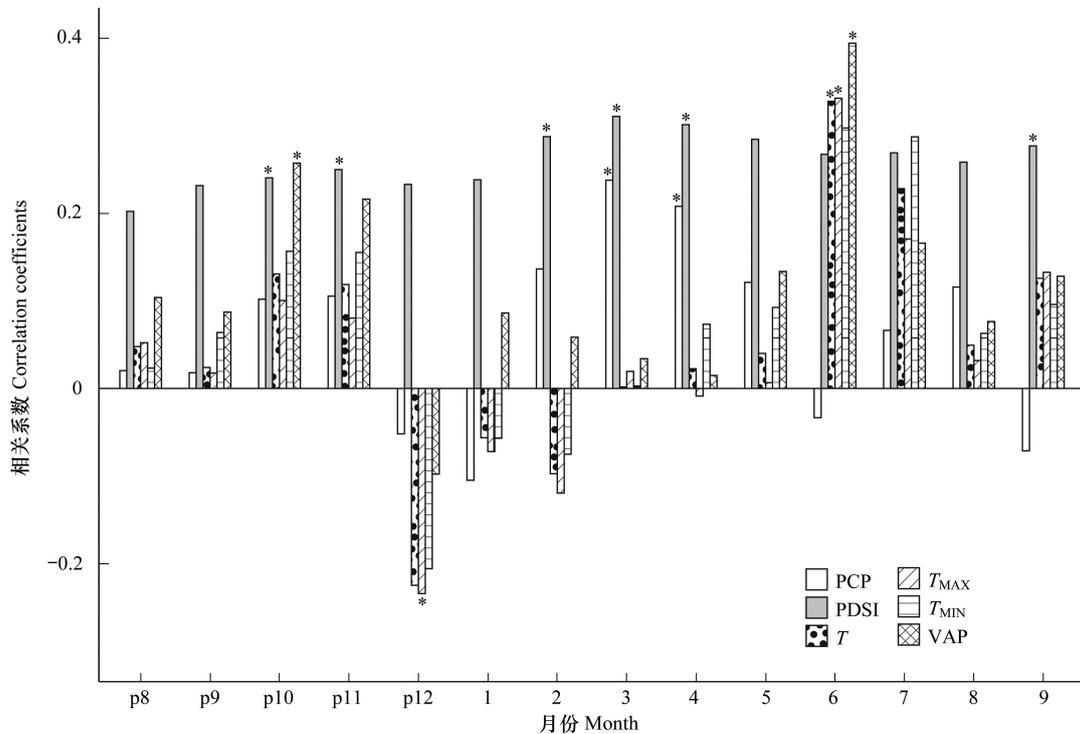


图9 西伯利亚云杉树轮宽度年表(1940—2016年)与月气候因子的相关性

Fig.9 Correlation between ring width chronology of *Picea obovata* (1940—2016) and monthly climate factors

度负相关的研究结果不同,可能是由于研究区的生长季温度较新疆阿尔泰山更低,因此呈现出不同的响应结果^[43]。生长季前期,充足的降雪可以有效地维持土温。同时,在融雪初期,大量的水分也有利于树木生长。伴随生长季到来,气温逐渐升高,土壤水分蒸发量增加,水汽压增大,植物叶片可以从空气中吸收水分,提升了光合作用的速率,有利于有机碳物质的积累,从而加快生长。由于该树种喜湿,生长季期间(6—8月),土壤水分充足,可以保证树木的快速生长,而在生长季前、后两个阶段由于土壤水分的不足,树木生长会受到干旱带来的限制。

5 结论

本研究表明,树木径向生长-气候因子的关系在树种间存在一定的相似性,西伯利亚冷杉与西伯利亚云杉、西伯利亚云杉和西伯利亚落叶松、西伯利亚云杉与西伯利亚红松对于特定气候因子的响应有一致性。但同时,也存在着显著的差异,这种差异可能主要缘于树种生理特征的差异以及种间遗传因素的差异。西伯利亚冷杉的生长对干旱的响应最为强烈,因此主要受干旱限制。而温度则是西伯利亚落叶松的主要限制因子,其径向生长主要受到生长季低温及生长后期高温、高湿的不利影响。西伯利亚红松对于气候因子的敏感性较弱,主要受生长季前期降水、生长季温度的限制。西伯利亚云杉在生长季受温度限制,生长季之外主要受水分限制。综上所述,西伯利亚冷杉和西伯利亚云杉主要对区域水分变化敏感,而西伯利亚落叶松和西伯利亚红松则对温度更敏感。本研究结果说明,在气候变化的背景下,优势树种间对气候响应的差异会对林分结构、森林动态等产生重要影响,进一步证明了多树种径向生长-气候关系的研究有助于正确反映森林动态。该区域优势树种的可能会随着气候变化表现出不同的生长状态,从而影响该地区森林生态系统的群落组成以及分布格局,该结果可以为该区域森林管理与生态保护工作提供依据。

参考文献 (References):

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global Warming of 1.5 °C. [2019-08-08]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.

- [2] Kerhoulas L P, Kane J M. Sensitivity of ring growth and carbon allocation to climatic variation vary within ponderosa pine trees. *Tree Physiology*, 2012, 32(1): 14-23.
- [3] Franks S J, Weber J J, Aitken S N. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. *Evolutionary Applications*, 2014, 7(1): 123-139.
- [4] Girard F, Payette S, Gagnon R. Dendroecological analysis of black spruce in lichen-spruce woodlands of the closed-crown forest zone in eastern Canada. *Écoscience*, 2011, 18(3): 279-294.
- [5] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2015, 35(19): 6481-6488.
- [6] 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 苑全治, 吴绍洪. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2014, 34(6): 1568-1574.
- [7] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 孙涛, 李兴欢, 黄唯, 刘瑞鹏, 李元昊. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1341-1352.
- [8] Altman J, Fibich P, Santruckova H, Dolezal J, Stepanek P, Kopacek J, Hunova I, Oulehle F, Tumajer J, Cienciala E. Environmental factors exert strong control over the climate-growth relationships of *Picea abies* in Central Europe. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 506-516.
- [9] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 李兴欢, 刘瑞鹏, 黄唯, 孙涛, 赵晶. 凉水自然保护区不同皮型红松径向生长对气候的响应. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2511-2520.
- [10] Huang J G, Tardif J C, Bergeron Y, Denneler B, Berninger F, Girardin M P. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 711-731.
- [11] 张卫国, 肖德荣, 田昆, 陈广磊, 和荣华, 张赞. 玉龙雪山 3 个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应. *生态学报*, 2017, 37(11): 3796-3804.
- [12] 王婷, 李聪, 张弘, 任思远, 李鹿鑫, 潘娜, 袁志良, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5324-5332.
- [13] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Fan Z A, Zhang T W, Shang H M, Zhang R B, Yu S L, Ji C R, Qin L. Climatic response of ring width and maximum latewood density of *Larix sibirica* in the Altay Mountains, reveals recent warming trends. *Annals of Forest Science*, 2012, 69(6): 723-733.
- [14] Taynik A V, Barinov V V, Oidupaa O C, Myglan V S, Reinig F, Büntgen U. Growth coherency and climate sensitivity of *Larix sibirica* at the upper treeline in the Russian Altai-Sayan Mountains. *Dendrochronologia*, 2016, 39: 10-16.
- [15] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, 43: 143-151.
- [16] 崔宇, 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 尚华明, 张瑞波. 新疆阿尔泰山森林上树线树轮宽度的气候响应. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 658-664.
- [17] Chen F, Mambetov B, Maisupova B, Kelgenbayev N. Drought variations in Almaty (Kazakhstan) since AD 1785 based on spruce tree rings. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(8): 2097-2105.
- [18] Nosenko G A, Nikitin S A, Khromova T E. Glacier area and volume changes in the Mountain Altai (Russia) since the mid-twentieth century from space imagery data. *Ice Snow*, 2014, 2: 5-13.
- [19] Kharuk V I, Petrov I A, Dvinskaya M L, Im S T, Shushpanov A S. Comparative reaction of larch (*Larix sibirica* Ledeb.) radial increment on climate change in the forest steppe and highlands of southern Siberia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, 11(4): 388-395.
- [20] Shaghdanova M, Mikhailov N, Larin S, Bredikhin A. *The Mountains of southern Siberia*. Oxford: Oxford University, 2002.
- [21] 中国科学院中国植物志编辑委员会. *中国植物志*. 北京: 科学出版社, 1959-2004.
- [22] 姜盛夏, 袁玉江, 喻树龙, 张同文, 陈峰, 尚华明, 张瑞波, 崔宇. 额尔齐斯河上游西伯利亚云杉树轮宽度年表特征分析及其对气候的响应. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(2): 16-23.
- [23] De Grandpré L, Tardif J C, Hessel A, Pederson N, Conciatori F, Green T R, Oyunsanaa B, Baatarbileg N. 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*, 2011, 41(6): 1242-1255.
- [24] 刘蕊, 王勇辉, 姜盛夏, 张瑞波, 秦莉, Mambetov B T, Kelgenbayev N, Dosmanbetov D, Maisupova B, 张同文. 哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应. *干旱区研究*, 2019, 36(3): 723-733.
- [25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [26] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 115-124.
- [27] Cook E R, Holmes R L. *Users Manual for Program ARSTAN: Laboratory of Tree-Ring Research*. Tucson: University of Arizona, 1986.
- [28] Chen L, Huang J G, Stadt K J, Comeau P G, Zhai L H, Dawson A, Alam S A. Drought explains variation in the radial growth of white spruce in

- western Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 233: 133-142.
- [29] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. URL. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018. [2019-08-08]. <https://www.R-project.org/>.
- [30] Zang C, Biondi F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, 38(4): 431-436.
- [31] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [32] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政. 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*, 2011, 35(7): 707-721.
- [33] 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*, 2005, 16(1): 14-20.
- [34] 余春燕. 喀纳斯自然保护区主要树种蒸腾耗水特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [35] 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. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应. *生态学报*, 2010, 30(9): 2246-2253.
- [36] Moiseev P A. Effect of climatic changes on radial increment and age structure formation in high-mountain larch forests of the Kuznetsk Ala Tau. *Russian Journal of Ecology*, 2002, 33(1): 7-13.
- [37] Velisevich S N, Kozlov D S. Effects of temperature and precipitation on radial growth of *Siberian larch* in ecotopes with optimal, insufficient, and excessive soil moistening. *Russian Journal of Ecology*, 2006, 37(4): 241-246.
- [38] Dulamsuren C, Khishigjargal M, Leuschner C, Hauck M. Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(1): 24-38.
- [39] Blanchet G, Guillet S, Calliari B, Corona C, Edvardsson J, Stoffel M, Bragazza L. Impacts of regional climatic fluctuations on radial growth of Siberian and Scots pine at Mukhrino mire (central-western Siberia). *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1209-1216.
- [40] 张贇, 尹定财, 张卫国, 岳海涛, 杜杰次丹, 李秋平, 杨荣, 田昆. 普达措国家公园 2 个针叶树种径向生长对温度和降水的响应. *生态学报*, 2018, 38(15): 5383-5392.
- [41] Nikolaeva S A, Savchuk D A, Bocharov A Y. Influence of different factors on tree growth of *Pinus sibirica* in the highlands of the central Altai mountains. *Journal of Siberian Federal University Biology*, 2015, 8(3): 299-318.
- [42] Kharuk V I, Ranson K J, Im S T, Dvinskaya M L. Response of *Pinus sibirica* and *Larix sibirica* to climate change in southern Siberian alpine forest-tundra ecotone. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, 24(2): 130-139.
- [43] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Zhang T W, Shang H M, Zhang R B. Precipitation reconstruction for the southern Altay Mountains (China) from tree rings of *Siberian spruce*, reveals recent wetting trend. *Dendrochronologia*, 2014, 32(3): 266-272.