

阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的分异响应

焦亮^{1,2*} 王玲玲¹ 李丽¹ 陈晓霞¹ 闫香香¹

¹西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; ²中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 乌鲁木齐 830002

摘要 在全球气候变暖的背景下, 北半球中高纬度地区出现了树轮径向生长对气候变化的分异响应现象, 但是阿尔泰山优势针叶树种对气候因子响应的稳定性还存在不确定性。该研究选择阿尔泰山中段高海拔西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)样本建立了树轮宽度年表, 并对年表特征及树木径向生长–气候的动态关系进行了分析。结果表明: 生长季初期和中期的气温是研究区树木生长的主控气候因子; 树木径向生长与当年4月的气温显著负相关, 与当年6–7月的气温显著正相关; 研究区西伯利亚落叶松径向生长与当年4月和6–7月的气温发生了分异现象, 表现为随着气候变化, 树木径向生长对生长季初期由高温引起的干旱的响应敏感性越来越强, 而对生长季中期气温的敏感性表现出先减弱再增强的趋势。阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应比较敏感, 适合开展树木生长–气候变化的研究; 检验树木径向生长对气候变化分异响应为该区域基于树木年轮开展历史气候重建和提高未来森林生态系统发展趋势预测的准确性提供了科学依据。

关键词 分异响应; 气候变化; 西伯利亚落叶松; 树木年轮学; 阿尔泰山

焦亮, 王玲玲, 李丽, 陈晓霞, 闫香香 (2019). 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的分异响应. 植物生态学报, 43, 320–330. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0014

Divergent responses of radial growth of *Larix sibirica* to climate change in Altay Mountains of Xinjiang, China

JIAO Liang^{1,2*}, WANG Ling-Ling¹, LI Li¹, CHEN Xiao-Xia¹, and YAN Xiang-Xiang¹

¹College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; and ²Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi, Ürümqi 830002, China

Abstract

Aims The objective of this study was to determine the temporal stability of relationships between radial growth of *Larix sibirica* and climatic factors in Altay Mountains.

Methods Tree-ring samples were collected at high altitude (2 069 m) in Altay Mountains of Xinjiang, China. Residual chronologies (RES) were established by using the tree-ring width data. Growth-climate relationships were investigated by calculating the Pearson correlation coefficients between tree-ring width chronology and climatic factors. Moreover, the variations in radial growth in response to climatic factors were calculated by a moving correlation function with a 30-year time window using the DendroClim 2002 program.

Important findings Temperature in the early and middle growing seasons exerted the greatest control on the radial growth in *Larix sibirica* of the study region, with a significant negative correlation between the radial growth of trees and the air temperatures in the current April (mean minimum air temperature: $r = -0.308$, $p < 0.05$; mean air temperature: $r = -0.324$, $p < 0.05$; mean maximum air temperature: $r = -0.330$, $p < 0.05$), and a significant positive correlation between the radial growth and temperatures from June to July (mean minimum air temperature: $r = 0.499$, $p < 0.01$; mean air temperature: $r = 0.456$, $p < 0.01$; mean maximum air temperature: $r = 0.431$, $p < 0.01$). The radial growth in *Larix sibirica* exhibited divergent responses to temperature in April and from June to July. Specifically, with the changes in climate, the radial growth response sensitivity of trees showed a gradually increasing trend to drought caused by high temperature in current April, while the sensitivity to the

收稿日期Received: 2019-01-15 接受日期Accepted: 2019-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(41861006)和甘肃省高等学校科研项目(2018C-02)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41861006), and the Scientific Research Program of Higher Education Institutions of Gansu Province (2018C-02).

* E-mail: jiaoliang@nwnu.edu.cn

temperature decreased initially and then increased from the current June to July. Our results show that the radial growth of *Larix sibirica* in Altay Mountains was sensitive to climatic factors, making it suitable to study the relationships between tree growth and climate change. Under climate change, our findings on divergent response of radial growth in *Larix sibirica* to climatic factors would provide a scientific basis for accurately reconstructing historical climate and predicting forest ecosystem dynamics based on tree-ring data.

Key words divergent response; climate change; *Larix sibirica*; dendroclimatology; Altay Mountains

Jiao L, Wang LL, Li L, Chen XX, Yan XX (2019). Divergent responses of radial growth of *Larix sibirica* to climate change in Altay Mountains of Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43, 320–330. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0014

全球变暖已成为不争的事实, 北半球中高纬度地区是增温最快的区域(IPCC, 2013), 特别是阿尔泰山的气候特征总体发生了由暖干向暖湿的转变(姜盛夏等, 2017)。气候变暖对山地森林生态系统的影响比较剧烈, 尤其是对其稳定性、结构、功能和碳汇等具有一系列重要的影响(刘国华和傅伯杰, 2001)。不同区域的树木对气候变暖的响应也各有差异, 因此非常有必要广泛地开展气候变化对各个区域森林生态系统影响的研究。而树木年轮因具有定年准确、连续性强、分辨率高、地域分布广泛、时间序列长等优势, 因而在气候重建和树木生长-气候关系的研究中扮演着非常重要的角色(Briffa *et al.*, 2004)。

20世纪下半叶随着气候变暖, 人们发现北半球中高纬度地区的树木径向生长对气候因子响应的敏感性降低了, 这种现象被称为“分异问题”(Jacoby & D'Arrigo, 1995; Briffa *et al.*, 1998; D'Arrigo *et al.*, 2008)。在目前的相关研究中, *Picea glauca*、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)、欧洲黑松(*Pinus nigra*)、长白山的红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、大兴安岭落叶松(*Larix gmelinii*)、天山西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)及雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)等树种均出现了生长分异的现象(王森等, 1995; D'Arrigo *et al.*, 2005; Vila *et al.*, 2008; Martin-Benito *et al.*, 2010; 于健等, 2013; Jiao *et al.*, 2015; 常永兴等, 2017; 张艳静等, 2017; 张晴等, 2018)。但是因为树种和区域的复杂性及其分异特征和原因的多样性, 分异研究结论存在较大的差异。首先, 相同区域不同树种的分异表现不同, 祁连山、贺兰山的油松(*Pinus tabulaeformis*)和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)发生了分异, 而青海云杉(*Picea crassifolia*)没有发生分异(Zhang *et al.*, 2009); 其次, 同一树种在不同区域是否发生分异也存在争议, 西伯利亚落叶松在天山东段发生了分异响应(Jiao *et al.*,

2015), 而在阿尔泰山对温度的响应没有出现明显的分异现象(尚华明等, 2010; Chen *et al.*, 2012); 最后, 树木径向生长对气候变化发生分异的具体表现也不同, 有的对气候因子响应的敏感性减弱(Jacoby & D'Arrigo, 1995; 张晴等, 2018), 也有的增强(Yu *et al.*, 2013)。因此, 亟待对不同类型的森林生态系统的分异结果进行检验。

阿尔泰山是亚洲中部重要的山脉, 树木年轮学者虽然在此开展了大量树木生长-气候关系的研究, 但以往研究多集中于历史气候重建(姜盛夏等, 2016; 牛军强等, 2016)和树木生长-气候线性关系的研究(张瑞波等, 2012; 黄力平等, 2015), 该区域树木径向生长对气候变化是否发生分异响应还有待于进一步的检验。鉴于此, 本文以生态脆弱的阿尔泰山中段贾登峪国家森林公园(48.50° N, 87.18° E)为研究区域, 以对气候敏感的优势针叶树种西伯利亚落叶松为研究树种, 分析了阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的主控气候因子, 检测了树木径向生长对主控气候因子响应的稳定性, 研究结果可为气候变化背景下阿尔泰山森林生态系统的动态预测提供科学依据, 为其生态保护和管理提供科学指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

阿尔泰山是一座重要的国际山脉, 主体位于新疆准噶尔盆地东北侧与蒙古的国界线上, 西北延伸至俄罗斯及哈萨克斯坦境内, 中国境内的阿尔泰山属中段南坡。山区土壤呈明显的垂直带状分布, 由高到低依次为冰沼土、高山草甸土、亚高山草甸土、生草灰化土、灰色森林土、黑钙土、栗钙土、棕钙土等(胡建等, 2014)。山区森林资源丰富, 在800–3 500 m范围内由下至上的植被分布大体为灌木草原、森林草原、高山-亚高山草甸草原、苔藓类垫状植物。优势针叶树种主要有西伯利亚落叶松、

西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*)、西伯利亚云杉(*Picea obovata*)等(卢俊培, 1960; 李漠岩等, 2011)。阿尔泰山主要受西风环流的控制, 属北温带大陆性气候, 年平均气温(1959–2012年) 4.6 °C, 最热月7月的平均气温是21.7 °C, 最冷月1月的平均气温是−15.3 °C, 年降水量(1959–2012年) 194.2 mm, 降水主要集中在夏季(图1)。研究区的气温和降水量逐年增加, 年平均最低气温、平均气温和平均最高气温分别以每10年0.4 °C、0.3 °C和0.3 °C的速率递增, 年降水量的增幅是每10年13.9 mm, 这验证了西北地区气候近50年从暖干向暖湿转变的事实(施雅风等, 2003)。此外, 降水和气温在年际的动态变化过程中表现不同: 降水总体上呈波动上升的趋势(每10年13.9 mm), 且在近几年也呈显著增加的趋势, 与其总体变化特征保持一致; 而气温(平均最低气温、平均气温和平均最高气温)虽然整体上是逐年增加的, 但在2007年开始出现了显著下降的趋势(图2)。

1.2 研究方法

1.2.1 树轮的野外采样

按森林分布状况, 在研究区阿尔泰山中段的贾

登峪国家森林公园西伯利亚落叶松分布的上林线(48.50° N, 87.18° E, 海拔2 069 m)进行群落调查和树芯采集(坡度约17°)。选取了没有受到人类活动影响及个体相互竞争影响较小的样树, 以尽可能地减

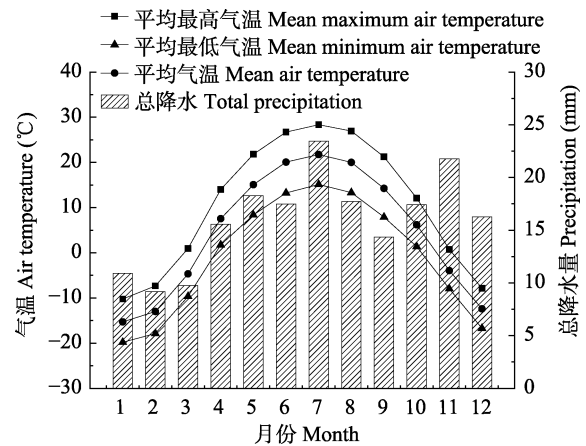


图1 1959–2012年阿尔泰山研究区月平均最低气温、平均气温、平均最高气温和降水量的变化。

Fig. 1 Variations in monthly mean minimum air temperature, mean air temperature, mean maximum air temperature and total precipitation from 1959 to 2012 in study area of Altay Mountains.

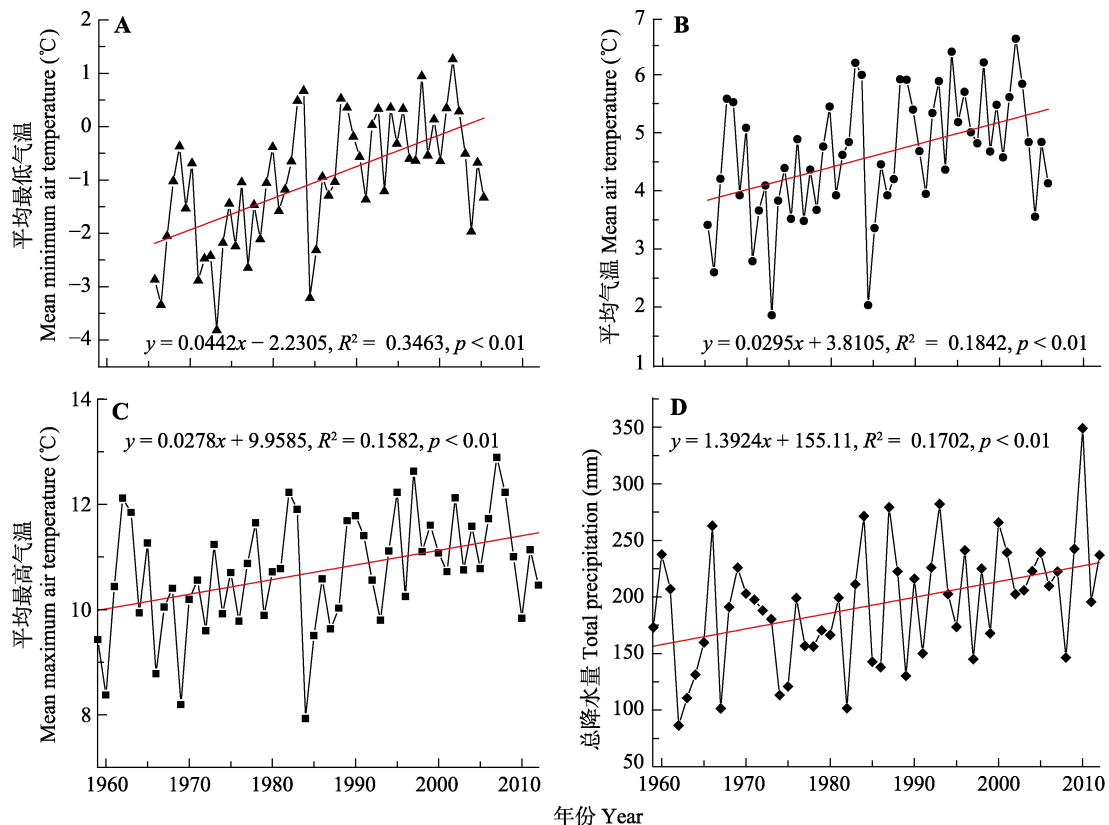


图2 阿尔泰山研究区平均最低气温、平均气温、平均最高气温和降水量的年际变化(1959–2012年)。

Fig. 2 Variations in annual mean minimum air temperature, mean air temperature, mean maximum air temperature and total precipitation during 1959–2012 in study area of Altay Mountains.

少非气候因子对树木径向生长的影响。随机设置了3个20 m × 20 m的样方, 通过群落调查, 采样点树木总盖度为30.0%, 平均树间距3.0 m, 平均胸径31.2 cm, 平均树高16.0 m, 树木平均冠幅2.7 m。在树木胸径的位置使用直径为5.15 mm的生长锥沿垂直坡向和平行坡向分别钻取两个树芯, 并将取得的样芯放入纸筒内, 封好纸筒两端, 标记好编号。于2013年8月采集了25棵活树的50个树芯。

1.2.2 样品的实验室处理

将野外采集的树轮样芯带回实验室后, 按照树木年轮学的基本原理和标准程序进行处理(吴祥定, 1990)。首先将样芯进行风干, 按样芯顺序用白乳胶将其固定在样本木槽内, 待白乳胶与样芯凝固干燥后, 先后使用120、400和600目的砂纸进行打磨, 直至样芯的年轮边界清晰。然后对每个样芯进行交叉定年, 之后利用精度为0.001 mm的LINTAB测量系统逐年测量样芯树轮宽度值。最后, 使用COFECHA软件对测量后的样本序列结果进行质量检验, 消除定年和宽度测量过程中出现的误差, 以保证每个年轮的年代准确无误(Holmes, 1983)。

1.2.3 树轮年表的建立

利用ARSTAN程序对交叉定年完成的树轮宽度序列去除生长趋势, 并建立树轮宽度年表(Cook, 1985)。为了消除树轮宽度序列中与树龄有关的生物学趋势及非气候因子所引起的树木生长波动, 同时又尽可能多地保留气候信息, 均采用传统的负指数函数方法去除序列的生长趋势, 然后用双权重平均法进行年轮曲线的标准化处理, 最终获得采样点3种类型的树轮宽度年表: 标准年表、差值年表和自回归年表。由于差值年表具有高质量的高频信息, 可表现出序列的高频振荡特点, 在目前树轮气候研究中应用较广, 因此选用了差值年表进行树木生长-气候动态关系的分析(邵雪梅和吴祥定, 1994; Gatzol *et al.*, 2015)。

1.2.4 树轮年表参数的计算

为了评估树木年轮的质量及其所包含的气候信息量的大小, 计算了树轮宽度年表的统计参数, 包括平均敏感度(*MS*)、标准偏差(*SD*)、一阶自回归系数(*ACI*)、样本相关系数(*RI*)、树内相关系数(*R2*)、树间相关系数(*R3*)、第一主分量方差(*PCI*)、信噪比(*SNR*)和样本总体解释量(*EPS*)。年表的*SD*、*MS*、*RI*、*R2*、*R3*数值越大表明树轮对气候变化越敏感; *SNR*

数值越大表明年表包含的气候信息越丰富; *PCI*和*EPS*可以反映采样树木对研究区域树木总体代表性的强弱, 特别是*EPS*值大于0.85, 说明样本的代表性较好, 年表的质量较高; *ACI*可反映前一年的气候对当年树轮宽度生长的持续影响(彭剑峰等, 2006; 袁晴雪等, 2010)。

1.2.5 气象资料

研究中所用气象资料来自于距离采样点最近的2个气象站, 分别是哈巴河(48.05° N, 86.35° E, 海拔约532.6 m, 距采样点约73 km)和阿勒泰(47.73° N, 88.73° E, 海拔约735.3 m, 距采样点约105 km)。所用的气象数据有1959–2012年月平均最低气温、平均气温、平均最高气温和总降水量。考虑到树木径向生长的“滞后效应”(即树木径向生长不仅受到当年气候条件的影响, 而且受到前一年气候因子的制约), 研究中还选取了前一年10月至当年10月及当年6–7月的气候因子(平均最低气温、平均气温、平均最高气温和总降水量)与树木径向生长进行相关性分析和响应的稳定性分析。

1.2.6 树木径向生长-气候关系分析

应用SPSS 19软件计算西伯利亚落叶松树轮宽度年表与气候因子的Pearson相关系数, 相关系数越大说明该气候因子对树木径向生长的影响越强烈。此外, 为了精确评估树木径向生长对气候因子响应的稳定性, 使用DendroClim 2002软件以固定的开始年份向后滑动的方法, 分析了树木年表与各气候因子关系的动态变化(滑动窗口30年), 该方法使用拔靴法(Bootstrap) 1 000次重采样计算相关系数, 并在 $\alpha = 0.05$ 水平下对其进行显著性检验。

2 结果和分析

2.1 年表特征分析

通过对采样点树轮年表统计参数特征的分析(表1), 可以得出树轮的平均序列长度为246 a (1767–2012年), 阿尔泰山西伯利亚落叶松采样点年表的*MS*、*SD*和*RI*较大(分别为0.216、0.212和0.467), 说明树轮年表对气候因子响应较为敏感; 年轮的*SNR* (38.59)也相对较高, 说明非气候因素形成的噪音较小, 年表包含的气候信息较强, 年表的质量相对较高; *ACI*为0.122, 说明树木径向生长受到前一年气候要素的影响较小; *PCI*和*EPS*分别为48.5%和0.975 (大于0.85), 这反映了样树对研究区域总体的

表1 阿尔泰山西伯利亚落叶松轮值年表主要特征参数
Table 1 Main parameters of tree-ring residual chronology of *Larix sibirica* in Altay Mountains

统计特征 Statistics	数值 Value
平均敏感度 Mean sensitivity (<i>MS</i>)	0.216
标准偏差 Standard deviation (<i>SD</i>)	0.212
一阶自回归系数 First-order serial autocorrelation (<i>ACI</i>)	0.122
样本相关系数 Correlation coefficient for all series (<i>R1</i>)	0.467
树内相关系数 Correlation coefficients within trees (<i>R2</i>)	0.673
树间相关系数 Correlation coefficients between trees (<i>R3</i>)	0.463
第一主分量方差 Variance in first eigenvector (<i>PCI</i>)(%)	48.5
信噪比 Signal-to-noise ratio (<i>SNR</i>)	38.59
样本总体解释量 Expressed population signal (<i>EPS</i>)	0.975
信号强度(<i>SSS</i>) > 0.85起始年(树芯数) First year of <i>SSS</i> > 0.85 (Number of tree-ring)	1 788 (6)

代表性较好，年表的质量较高。

2.2 树轮宽度年表对气候因子的响应

分析树木径向生长与平均最低气温、平均气温、平均最高气温和总降水量等气候因子的相关关系，结果显示研究区树木径向生长与各月的总降水量都没有显著相关关系($p > 0.05$; 图3)，而分别与当年4月、当年6月、当年7月及当年6–7月的平均最低气温、平均气温和平均最高气温显著相关($p < 0.05$)，这说明生长季初期(当年4月)和中期(当年6–7月)的气温是研究区西伯利亚落叶松径向生长的主控气候因子(图4)。

平均最低气温：树轮宽度年表与当年4月的平均最低气温显著负相关($r = -0.308, p < 0.05$)，与当年6月($r = 0.453, p < 0.01$)、当年7月($r = 0.331, p < 0.05$)和当年6–7月($r = 0.499, p < 0.01$)的平均最低气温显著正相关。

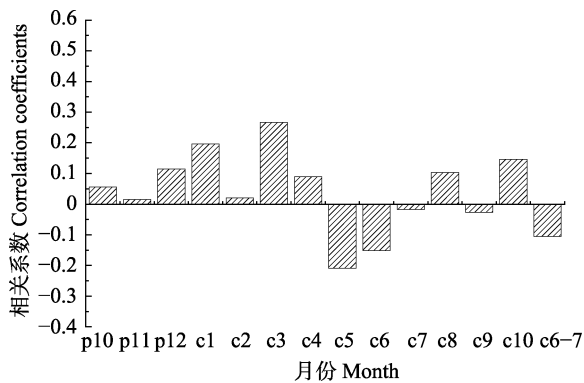


图3 阿尔泰山西伯利亚落叶松树轮宽度年表与月总降水量的相关性。p, 前一年; c, 当年。
Fig. 3 Correlations between tree-ring width chronology of *Larix sibirica* and monthly total precipitation from 1959 to 2012 in Altay Mountains. p, previous year; c, current year.

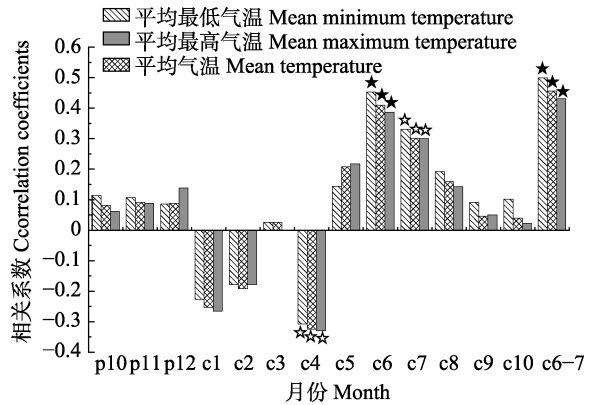


图4 阿尔泰山西伯利亚落叶松树轮宽度年表与月平均最低气温、平均气温和平均最高气温的相关性。空心五角星代表显著相关, $p < 0.05$; 实心五角星代表极显著相关, $p < 0.01$ 。p, 前一年; c, 当年。

Fig. 4 Correlations between tree-ring width chronology of *Larix sibirica* and monthly mean minimum temperature, mean temperature and mean maximum temperature from 1959 to 2012 in Altay Mountains. The open pentagons represent significant correlation at the 0.05 level and the solid pentagons represent significant correlation at the 0.01 level. p, previous year; c, current year.

平均最高气温：树轮宽度年表与当年4月的平均最高气温显著负相关($r = -0.330, p < 0.05$)，与当年6月($r = 0.387, p < 0.01$)、当年7月($r = 0.300, p < 0.05$)和当年6–7月($r = 0.431, p < 0.01$)的平均最高气温显著正相关。

平均气温：树轮宽度年表与当年4月的平均气温显著负相关($r = -0.324, p < 0.05$)，与当年6月($r = 0.410, p < 0.01$)、当年7月($r = 0.302, p < 0.05$)和当年6–7月($r = 0.456, p < 0.01$)的平均气温显著正相关。

2.3 树轮宽度年表与气候因子关系的稳定性分析

通过滑动相关分析树木径向生长与其主控气候因子的稳定性，结果发现树木年轮宽度年表与4月总降水量的相关性出现了由负转正的现象，特别是在后半期达到了显著正相关关系；而树木年轮宽度与当年4月的平均最低气温($y = -0.007 7x - 0.332 5, R^2 = 0.553 0, p < 0.05$)、平均气温($y = -0.011 3x - 0.298 3, R^2 = 0.716 9, p < 0.05$)和平均最高气温($y = -0.013 9x - 0.279 3, R^2 = 0.733 0, p < 0.05$)表现为负相关逐渐增强的趋势。这说明随着全球气候变暖，4月的干旱对树木生长的制约作用逐渐增强。

树木年轮宽度与当年6–7月的平均最低气温、平均气温和平均最高气温发生了分异响应的关系，具体表现出与平均最低气温($y = -0.014 3x + 0.614 8, R^2 = 0.612 8, p < 0.05$)、平均气温($y = -0.008 9x +$

0.463 9, $R^2 = 0.465\ 5$, $p < 0.05$)和平均最高气温($y = -0.008\ 1x + 0.431\ 6$, $R^2 = 0.408\ 6$, $p < 0.05$)正相关先减弱再增强的动态趋势。这说明随着全球气候变化, 生长季中期低温的限制作用表现出先逐渐减弱再增强的趋势特征。

3 讨论和结论

3.1 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的主控气候因子

随着全球气候变暖, 阿尔泰山的气候特征表现出由暖干向暖湿的转变过程, 这与近50年来西北地区的气候变化特征保持一致。为了确定分布在阿尔泰山区域的西伯利亚落叶松对气候变化是否发生分异响应, 选择了阿尔泰山中段的贾登峪国家森林公园为采样点, 构建了高海拔西伯利亚落叶松的树轮差值年表, 开展了西伯利亚落叶松径向生长—气候因子关系的稳定性研究。统计年表参数指标(表1), 可以看出研究区的西伯利亚落叶松对气候因子的响应表现较为敏感, 树轮年表包含的气候信息量较丰富, 年表适合做树木径向生长—气候动态变化的研究。

树轮年表与总降水量、平均最低气温、平均气温和平均最高气温的Pearson相关分析(图3, 图4)表明, 气温对研究区树木径向生长的影响较大, 特别是当年生长季的气温对阿尔泰山西伯利亚落叶松的径向生长尤为重要。阿尔泰山西伯利亚落叶松树轮宽度年表与当年4月的气温(平均最低气温、平均气温、平均最高气温)显著负相关($p < 0.05$), 与4月的总降水量呈正相关关系($p > 0.05$), 表明由气温升高引起的生长季初期的干旱是制约研究区树木径向生长的主要气候因素。一方面, 4月是西伯利亚落叶松早材形成的重要时期, 而早材在树轮宽度中占比较大, 生长季初期的高温则会加剧蒸腾作用和增大蒸发量, 使树木容易受到干旱胁迫而限制其径向生长, 形成较窄的早材宽度(Bntgen *et al.*, 2006); 另一方面, 在生长季初期树木对气温和水分相对比较敏感, 研究区树轮宽度与4月气温负相关, 而与降水正相关, 这表明当气温高于树木生长的临界值时, 树木会因呼吸强度增加和营养消耗增强而使光合净积累减少, 形成较窄的年轮宽度(Day *et al.*, 2002)。同时, 研究区树轮年表与4月的降水量没有达到显著相关关系($p > 0.05$; 图3), 主要原因是研究区逐渐增

加的降水量(每10年13.9 mm)会缓解树木生长对水分的需求; 而且阿尔泰山冬季降雪量较大, 春末夏初气温的回升带来的冰雪融水也会补充树木生长所需的水分(吴祥定, 1990; 胡建等, 2014)。综上所述, 由气温升高引起的干旱压力是阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的主控因子。以往大量的研究结果也证明了这一结论, 例如*Picea glauca*、天山的雪岭云杉、芦芽山的华北落叶松(*Larix principis-ruprechtii*)、阿尔泰山的西伯利亚落叶松、玉龙雪山的丽江云杉(*Picea likiangensis*)等树木也表现出高温引起的干旱胁迫对其生长具有限制作用(Barber *et al.*, 2000; D'Arrigo *et al.*, 2008; 张文涛等, 2015; 张贇等, 2018a)。

树轮年表与气候因子的Pearson相关分析表明, 阿尔泰山高海拔西伯利亚落叶松还与当年6–7月的气温呈显著正相关关系($p < 0.01$; 图4)。由此判断, 当年生长季中期的气温对高海拔树木的生长是至关重要的。夏季(尤其6–7月)是树木生长最为旺盛的时段, 适宜的温度有利于增强光合效率和碳水化合物的积累, 可为树木后期的生长提供能量, 进而形成较宽的年轮(吴祥定, 1990)。同时, 研究区的西伯利亚落叶松生长在高海拔地区, 气温随着海拔升高而逐渐降低, 生长季寒冷的气候条件不能满足树木对适宜温度的需求, 所以这一时期的低温便成了限制树木径向生长的关键气候因子。普达措国家公园的丽江云杉和长苞冷杉(*Abies georgei*)、阿尔泰山的西伯利亚落叶松、长白山的长白落叶松、祁连山的青海云杉等相似的研究结果也证明了这个结论(勾晓华等, 2004; 尚华明等, 2010; 陈力等, 2014; 牛军强等, 2016; 于健等, 2016; 张贇等, 2018b)。

另外, 研究区树木径向生长与平均最低气温、平均气温和平均最高气温在当年6–7月均达到了显著相关关系($p < 0.01$), 但与平均最低气温的相关系数($r = 0.499$)明显高于平均最高气温($r = 0.431$), 说明平均最低气温对研究区树木径向生长的影响更大(图5)。这与阿尔泰山气温的年际变化趋势是相符合的, 从图2可以看出, 年平均最低气温的增幅(每10年0.4 °C)明显高于年平均最高气温(每10年0.3 °C)。由此可见, 生长季温度对研究区西伯利亚落叶松径向生长的贡献主要得益于6–7月平均最低气温的显著增高。从植物生理学角度讲, 6–7月是树木的快速生长期, 较高的平均最低气温可以延长树木的

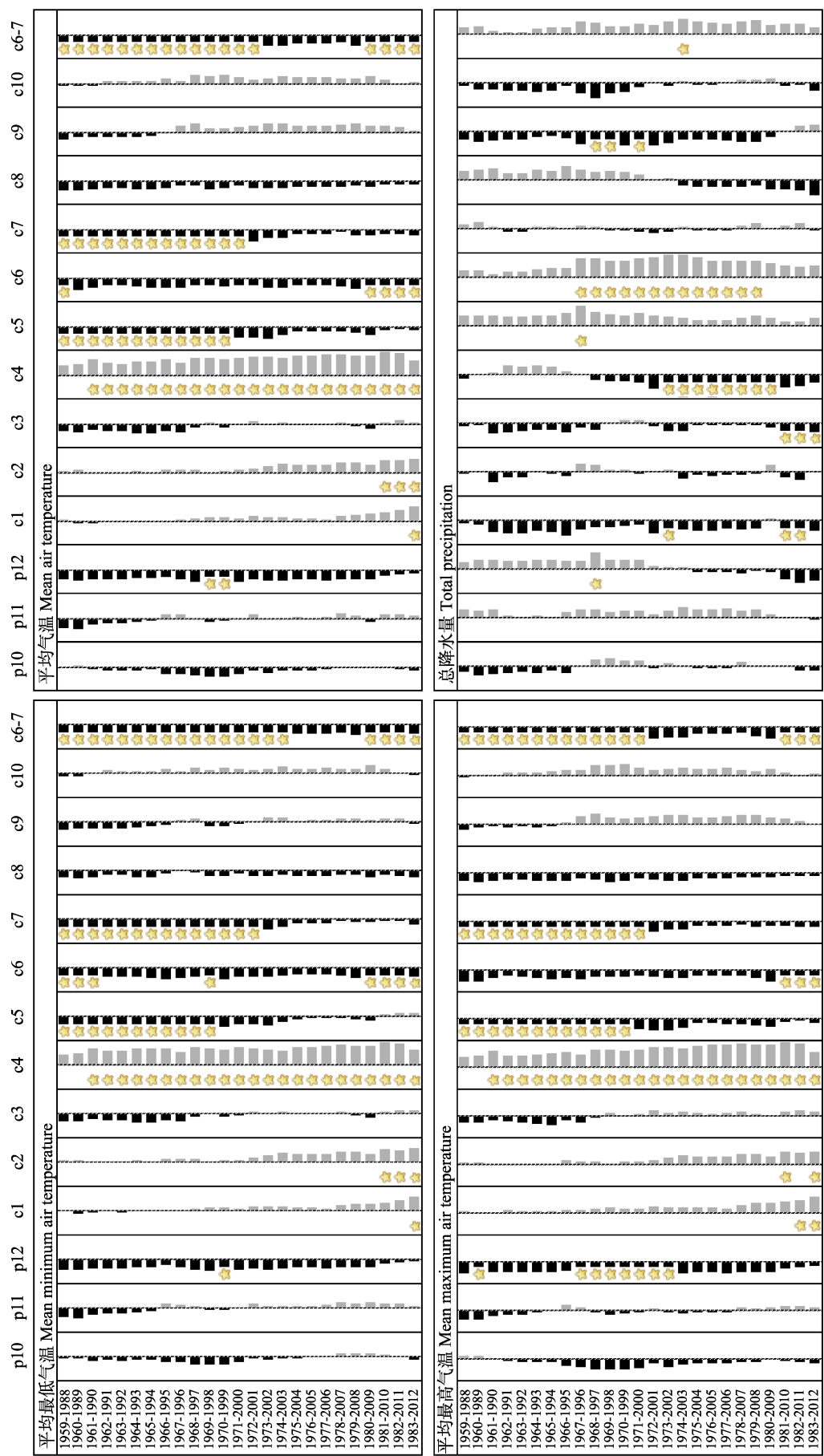


图5 阿尔泰山西伯利亚落叶松树轮宽度年表与月气候因子的滑动相关分析。滑动窗口: 30年; 五角星代表显著相关, $p < 0.05$; 黑色条柱代表正相关, 灰色条柱代表负相关。p, 前一年; c, 当年。
Fig. 5 Moving correlation between tree-ring width chronology in *Larix sibirica* and monthly climatic factors in Altay Mountains. Moving window: 30 years. The five-pointed stars represent significance at the 0.05 level. The black bars represent positive correlation and the gray bars represent negative correlation. p, previous year; c, current year.

生长季和增强树木的光合效率;同时,如果此时温度过低会冻伤树木的根、叶等器官和破坏叶绿素的活性,最终影响树木的径向生长(Fritts, 1976; 朱海峰等, 2004; 喻树龙等, 2008; Peng *et al.*, 2013)。

3.2 阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性

在本研究中,通过滑动相关分析发现树木年轮宽度与当年4月、6–7月的温度也发生了不稳定的响应关系。具体表现为当年6–7月树木径向生长对气温的敏感性降低了,此研究结论与以往“分异问题”有较为相似的结果。主要原因是随着全球气候变暖,气温逐渐满足了树木生长需要的下限阈值(Day *et al.*, 2002; 周子建等, 2018),因而表现出随着气温升高,树木生长与其显著正相关的关系逐渐减弱的趋势;但同时也发现树木生长与当年6–7月气温的正相关性在近年来又表现出明显增强的趋势(图5),主要原因是从1998年起研究区的气温呈现出明显的下降趋势(平均最低气温: 每10年 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 平均气温: 每10年 $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; 平均最高气温: 每10年 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$),这说明随着该区域近年来气候的变冷,低温对树木生长的限制性作用再次体现出来。

当年4月由气温升高引起的干旱对树木生长的限制作用逐渐增强(图2),说明随着气温持续升高,原本有利于高海拔树木生长的温度条件超过了树木生长的阈值,进而转变为不利于树木生长。主要是随着全球变暖,气温的显著升高加快了土壤水分的蒸散速度,造成植物的物理性干旱而抑制树木径向生长,因而表现出当年4月树轮年表与气温的负相关关系逐渐增强,而与降水的相关关系由负转正的趋势(图5)。在对北天山的西伯利亚落叶松、长白山红松及大兴安岭南部的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)的研究中也发现了气温突变增加引起树木径向生长对温度响应敏感性增强的现象(Jiao *et al.*, 2015; 李俊霞等, 2017; 周子建等, 2018)。

3.3 结论

本研究证明西伯利亚落叶松是非常适合进行树木生长-气候动态关系研究的树种,而且阿尔泰山的气温是西伯利亚落叶松径向生长的主控气候因子,尤其是生长季初期4月 and 中期6–7月的气温是制约树木生长的主要因素,因此在森林保护和生态修复的过程中应加强该时段的树木养护管理。随着全球气候变暖,研究区西伯利亚落叶松径向生长对4月、

6–7月的气温表现出分异响应的特征,说明在阿尔泰山开展基于树木年轮的气候重建和全球变暖背景下森林生态系统发展趋势的预测时要关注优势针叶树木生长-气候关系稳定性的问题。

致谢 感谢中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室研究基金(Sqj2017004)资助。

参考文献

- Barber V, Juday GP, Finney B (2000). Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 405, 668–673.
- Bntgen U, Frank D, Schmidhalter M, Neuwirth B, Seifert M, Esper J (2006). Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees*, 20, 99–110.
- Briffa KR, Osborn TJ, Schweingruber FH (2004). Large-scale temperature inferences from tree rings: A review. *Global and Planetary Change*, 40, 11–26.
- Briffa KR, Schweingruber FH, Jones PD, Osborn TJ, Shiyatov SG, Vaganov EA (1998). Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 391, 678–682.
- Chang YX, Chen ZJ, Zhang XL, Bai XP, Zhao XP, Li JX, Lu X (2017). Responses of radial growth to temperature in *Larix gmelinii* of the Da Hinggan Ling under climate warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 279–289. [常永兴, 陈振举, 张先亮, 白学平, 赵学鹏, 李俊霞, 陆旭 (2017). 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应. 植物生态学报, 41, 279–289.]
- Chen F, Yuan YJ, Wei WS, Fan ZA, Zhang TW, Shang HM, Zhang RB, Yu SL, Ji CR, Li Q (2012). Climatic response of ring width and maximum latewood density of *Larix sibirica* in the Altay Mountains, reveals recent warming trends. *Annals of Forest Science*, 69, 723–733.
- Chen L, Yin YH, Zhao DS, Yuan QZ, Wu SH (2014). Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1568–1574. [陈力, 尹云鹤, 赵东升, 苑全治, 吴绍洪 (2014). 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, 34, 1568–1574.]
- Cook E (1985). *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*. PhD dissertation, The University of Arizona, Tucson, USA.
- D'Arrigo R, Mashig E, Frank D, Wilson R, Jacoby G (2005). Temperature variability over the past millennium inferred from Northwestern Alaska tree rings. *Climate Dynamics*, 24, 227–236.
- D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P (2008). On the “divergence problem” in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary*

- Change*, 60, 289–305.
- Day ME, Greenwood MS, Diaz-Sala C (2002). Age- and size-related trends in woody plant shoot development: Regulatory pathways and evidence for genetic control. *Tree Physiology*, 22, 507–513.
- Fritts HC (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London.
- Gazol A, Camarero JJ, Gutiérrez E, Popa I, Andreu-Hayles L, Motta R, Nola P, Ribas M, Sangüesa-Barreda G, Urbinati C, Carrer M (2015). Distinct effects of climate warming on populations of silver fir (*Abies alba*) across Europe. *Journal of Biogeography*, 42, 1150–1162.
- Gou XH, Chen FH, Yang MX, Peng JF, Qiang WY, Chen T (2004). Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 172–176. [勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 彭剑峰, 强维亚, 陈拓 (2004). 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化. *生态学报*, 24, 172–176.]
- Holmes RL (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.
- Hu J, Yu SL, Yuan YJ, Zhang TW, Shang HM, Zhang RB (2014). Characteristics of tree-ring width chronologies in the central Altay Mountains and climate response. *Desert and Oasis Meteorology*, 8, 19–26. [胡建, 喻树龙, 袁玉江, 张同文, 尚华明, 张瑞波 (2014). 阿尔泰山中部树轮宽度年表特征及其气候响应分析. *沙漠与绿洲气象*, 8, 19–26.]
- 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.]
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jacoby GC, D'Arrigo RD (1995). Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 227–234.
- Jiang SX, Yuan YJ, Qin L, Yu SL, Shang HM, Lu MX, Zhang TW (2017). Analysis on climate and hydrology change characteristics during historical time in the Altai Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39, 672–679. [姜盛夏, 袁玉江, 秦莉, 喻树龙, 尚华明, 陆明鑫, 张同文 (2017). 阿尔泰山历史时期气候水文变化特征分析. *冰川冻土*, 39, 672–679.]
- Jiang SX, Yuan YJ, Wei WS, Shang HM, Zhang TW, Zhang RB, Qin L (2016). Early summer temperature history in the Altay Mountains recorded by tree rings during 1579–2009. *Journal of Desert Research*, 36, 1126–1132. [姜盛夏, 袁玉江, 魏文寿, 尚华明, 张同文, 张瑞波, 秦莉 (2016). 树轮记录的新疆阿尔泰山1579–2009年初夏温度变化. *中国沙漠*, 36, 1126–1132.]
- Jiao L, Jiang Y, Zhang WT, Wang MC, Zhang LN, Zhao SD (2015). Divergent responses to climate factors in the radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Tianshan Mountains, northwest China. *Trees*, 29, 1673–1686.
- Li JX, Bai XP, Zhang XL, Chang YX, Lu X, Zhao XP, Chen ZJ (2017). Different responses of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* growth to climate change in southern and northern forested areas in the Great Xing'an Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 7232–7241. [李俊霞, 白学平, 张先亮, 常永兴, 陆旭, 赵学鹏, 陈振举 (2017). 大兴安岭林区南、北部天然樟子松生长对气候变化的响应差异. *生态学报*, 37, 7232–7241.]
- Li MY, Yuan YJ, Wei WS, Zhang TW, Qin L (2011). Characteristics of tree-ring width chronologies in Western Altay and their response to climate change. *Desert and Oasis Meteorology*, 5, 16–21. [李漠岩, 袁玉江, 魏文寿, 张同文, 秦莉 (2011). 阿勒泰西部树轮宽度年表特征及其气候响应. *沙漠与绿洲气象*, 5, 16–21.]
- Liu GH, Fu BJ (2001). Effects of global climate change on forest ecosystems. *Journal of Natural Resources*, 16, 71–78. [刘国华, 傅伯杰 (2001). 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 16, 71–78.]
- Lu JP (1960). Relationship between forest soil and spruce and larch in Tianshan and Altay Mountains, China. *Soil Notification*, (4), 30–41, 16. [卢俊培 (1960). 我国天山和阿尔泰山的森林土壤与云杉和落叶松的关系. *土壤通报*, (4), 30–41, 16.]
- Martin-Benito D, Del RM, Canellas I (2010). Black pine (*Pinus nigra* Arn.) growth divergence along a latitudinal gradient in Western Mediterranean mountains. *Annals of Forest Science*, 67, 401.
- Niu JQ, Yuan YJ, Zhang TW, Shang HM, Zhang RB, Yu SL, Chen F, Jiang SX (2016). Characteristics of tree-ring width chronologies in Altay and their response to climate change. *Desert and Oasis Meteorology*, 10, 59–67. [牛军强, 袁玉江, 张同文, 尚华明, 张瑞波, 喻树龙, 陈峰, 姜盛夏 (2016). 阿尔泰山区两种树轮宽度年表气候响应特征. *沙漠与绿洲气象*, 10, 59–67.]
- Peng JF, Gou XH, Chen FH, Li JB, Liu PX, Tian QH, Zhang Y, Zhang YX (2006). The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledeb. to climatic change in eastern Tianshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2723–2731. [彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 李金豹, 刘普幸, 田沁花, 张永, 张永香 (2006). 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析. *生态学报*, 26, 2723–2731.]
- Peng SS, Piao SL, Ciais P, Myneni RB, Chen AP, Chevallier F,

- Dolman AJ, Janssens IA, Penuelas J, Zhang GX, Vicca S, WanSQ, Wang SP, Zeng H (2013). Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation. *Nature*, 501, 88–92.
- Shang HM, Wei WS, Yuan YJ, Yu SL, Zhang TW, Waheti AZMT, 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.]
- Shao XM, Wu XD (1994). Tree-ring Chronologies for *Pinus armandii* Franch from Hua Shan, China. *Acta Geographica Sinica*, 49, 174–181. [邵雪梅, 吴祥定 (1994). 华山树木年轮年表的建立. *地理学报*, 49, 174–181.]
- Shi YF, Shen YP, Li DL, Zhang GW, Ding YJ, Hu RJ, Kang ES (2003). Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China. *Quaternary Sciences*, 23, 152–164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永建, 胡汝骥, 康尔泗 (2003). 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 23, 152–164.]
- Vila B, Vennetier M, Ripert C, Chandiooux O, Liang EY, Guibal F, Torre F (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Annals of Forest Science*, 65, 709.
- Wang M, Bai SJ, Tao DL, Shan JP (1995). Effect of rise in air-temperature on tree ring growth of forest on Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6, 128–132. [王淼, 白淑菊, 陶大立, 单建平 (1995). 大气增温对长白山林木直径生长的影响. *应用生态学报*, 6, 128–132.]
- Wu XD (1990). *Tree Rings and Climate Change*. China Meteorological Press, Beijing. [吴祥定 (1990). 树木年轮与气候变化. 气象出版社, 北京.]
- Yu D, Liu J, Benard JL, Zhou L, Zhou W, Fang X, Wei Y, Jiang S, Dai L (2013). Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 300, 96–105.
- Yu J, Xu QQ, He X, Luo CW, Liu WH, Li JQ, Liu QJ (2013). Response divergence of *Larix olgensis* tree-ring widths to climate variation in eastern slope of Changbai Mountain, northeast China. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 33, 89–97. [于健, 徐倩倩, 何秀, 罗春旺, 刘文慧, 李俊清, 刘琪璟 (2013). 长白山东坡落叶松树轮宽度对气候响应的分离效应. *中南林业科技大学学报*, 33, 89–97.]
- Yu J, Xu QQ, Liu WH, Luo CW, Yang JL, Li JQ, Liu QJ (2016). Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 24–35. [于健, 徐倩倩, 刘文慧, 罗春旺, 杨君琰, 李俊清, 刘琪璟 (2016). 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应. *植物生态学报*, 40, 24–35.]
- Yu SL, Yuan YJ, Wei WS, Shang HM, Zhang TW, Tong Z, Du M (2008). Response of tree-ring to climate change and temperature reconstruction in west of Tianshan Mountains north slope. *Journal of Desert Research*, 28, 827–832. [喻树龙, 袁玉江, 魏文寿, 尚华明, 张同文, 童忠, 杜敏 (2008). 天山北坡西部树木年轮对气候因子的响应分析及气温重建. *中国沙漠*, 28, 827–832.]
- Yuan QX, Ye ZX, Wang LL, Shang HM, Yu SL (2010). Characteristics of tree width chronologies on Urumqi River mountainous basin and their responding to climate change. *Arid Land Geography*, 33, 394–403. [袁晴雪, 叶芝祥, 王丽丽, 尚华明, 喻树龙 (2010). 乌鲁木齐河山区流域树轮宽度年表特征及其对气候的响应. *干旱区地理*, 33, 394–403.]
- Zhang Q, Yu RD, Zheng HW, Yang ML, Gan M (2018). Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the eastern Tianshan Mountains. *Plant Research*, 38, 14–25. [张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 杨美琳, 甘淼 (2018). 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析. *植物研究*, 38, 14–25.]
- Zhang RB, Yuan YJ, Wei WS, Shang HM, Yu SL, Zhang TW, Chen F, Fan ZA, Qin L (2012). Response of stable carbon isotope of *Larix sibirica* Ledeb. tree-rings to climate change. *Arid Zone Research*, 29, 328–334. [张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 尚华明, 喻树龙, 张同文, 陈峰, 范子昂, 秦莉 (2012). 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应. *干旱区研究*, 29, 328–334.]
- Zhang WT, Jiang Y, Wang MC, Zhang LN, Dong MY (2015). Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 6481–6488. [张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇 (2015). 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*, 35, 6481–6488.]
- Zhang Y, Wilmking M, Gou XH (2009). Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China. *Plant Ecology*, 201, 39–50.
- Zhang Y, Yin DC, Sun M, Li LP, Tian K, Zhang WG (2018a). Response of radial growth of two conifers to temperature and precipitation in Potatso National Park, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 5383–5392. [张贇, 尹定财, 孙梅, 李丽萍, 田昆, 张卫国 (2018a). 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*, 38, 5383–5392.]
- Zhang Y, Yin DC, Tian K, Zhang WG, He RH, He WQ, Sun JM, Liu ZY (2018b). Radial growth responses of *Picea*

likiangensis to climate variabilities at different altitudes in Yulong Snow Mountain, southwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 629–639. [张贇, 尹定财, 田昆, 张卫国, 和荣华, 和文清, 孙江梅, 刘振亚 (2018b). 玉龙雪山不同海拔丽江云杉径向生长对气候变异的响应. 植物生态学报, 42, 629–639.]

Zhang YJ, Yu RD, Zheng HW, Gan M, Yang ML, Shi BB (2017). Difference in response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in the eastern and western Tianshan Mountains. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 2149–2159. [张艳静, 于瑞德, 郑宏伟, 甘淼, 杨美琳, 石冰冰 (2017). 天山东西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异. 生态学杂志, 36, 2149–2159.]

Zhou ZJ, Jiang Y, Dong MY, Tao Y, Wang MC, Ding XY (2018). Response of the relationship between radial

growth and climatic factors to abrupt change of temperature along an altitudinal gradient on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 4668–4676. [周子建, 江源, 董满宇, 陶岩, 王明昌, 丁新原 (2018). 长白山北坡不同海拔红松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应. 生态学报, 38, 4668–4676.]

Zhu HF, Wang LL, Shao XM, Fang XQ (2004). Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change. *Acta Geographica Sinica*, 159, 863–870. [朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 方修琦 (2004). 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应. 地理学报, 159, 863–870.]

特邀编委: 黄建国 责任编辑: 李 敏



扫码加入读者圈
听语音, 看问答