

阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应

尚华明^{1,2,3}, 魏文寿^{1,2}, 袁玉江^{1,*}, 喻树龙¹, 张同文¹, 瓦合提·艾则买提⁴, 李新建¹

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所; 新疆树木年轮生态实验室; 中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 新疆, 乌鲁木齐 830002; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 新疆气象局 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 在全球气候变暖的背景下, 中高纬度地区出现了树轮宽度对气候的响应分异现象, 在阿尔泰山南坡的森林上限, 西伯利亚落叶松树轮宽度对生长季温度敏感, 该区域树轮宽度对气候要素是否存在响应分异现象还不确定。建立了哈萨克斯坦境内阿尔泰山南坡的西伯利亚落叶松树轮宽度年表, 利用树轮资料和卡通卡拉盖气象站的气象资料, 分析了该站 1932 年以来的温度和降水变化趋势, 并利用相关函数分析了树轮宽度对气候要素的响应特征以及对温度响应关系的变化。结果表明: 1932 年以来该站温度上升趋势明显, 特别是冬季的升温最为显著, 降水呈微弱的下降趋势; 研究区树轮宽度与 6 月的温度显著正相关, 相关系数达到 0.60 以上, 该相关生理学意义明显; 滑动序列相关分析表明, 树轮宽度对 6 月温度的响应较为一致, 没有出现明显的响应分异现象。还发现了 1992 年是一个响应异常的年份, 是否与 1991 年的 Pinatubo 火山爆发有关还有待深入研究。

关键词: 哈萨克斯坦; 阿尔泰山; 西伯利亚落叶松; 树木年轮; 响应分异

Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altai Mountains

SHANG Huaming^{1,2,3}, WEI Wenshou^{1,2}, YUAN Yujia^{1,*}, YU Shulong¹, ZHANG Tongwen¹, Waheti Aizemaiti⁴, LI Xinjian¹

1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration; Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration; Urumqi 830002, China

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830010, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Xinjiang Meteorology Bureau, Urumqi 830002, China

Abstract: In the mid-to-high latitudes area, evidence for reduced sensitivity of tree growth to increasing temperature has been reported from multiple forests under the global warming background. This phenomenon, known as the “divergence problem” (DP), described the incapacity of temperature-sensitive tree-ring width to track increasing instrumental temperature measurements since the mid-20th century. In this study, the tree ring width at upper tree line was significantly positive relative to mean June temperature in the south slope of Altai Mountains. There is no report on the divergence response phenomena in this region. The time span of meteorological data from Katongkalagai of northeastern Kazakhstan is more than 70 years, much longer than that of western China, which benefited the testing of DP at the south slope of Altai Mountains. In autumn 2007, we took tree-ring samples of *Larix sibirica* Ledeb. with increment borer at the south slope of Altai Mountains, north eastern Kazakhstan. The tree-ring width series were detrended with negative exponent function and three tree ring width chronologies were developed by ASTAN program. Based on the meteorological data from Katongkalagai weather station, we analyzed the varying trends of precipitation and temperature since 1932. The annual precipitation of Katongkalagai has decreased by the rate of 8.3 mm (10 a)⁻¹, but the decreasing trend could not reach the 95% confidence

基金项目: 科技部公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY200706008, GYHY200806011); 国家自然科学基金资助项目(40975056); 科技基础性工作专项资助项目(2007FY220200); 科技部科研院所社会公益研究专项资助项目(2005DIB6J113)

收稿日期: 2009-09-30; **修订日期:** 2010-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanyuj5502@sina.com

level. However, the annual mean temperature of Katongkalagai has increased significantly since 1932 by the rate of $0.208\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, and winter temperature has increased by the fastest rate of $0.348\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$. This phenomenon, ‘warming in winter’, coincided to the uppermost contributor of global warming. Correlation analysis on tree-ring width and monthly precipitation and temperature of Katongkalagai from prior September to current September showed that tree-ring width was positive relative to mean temperature in June significantly with the coefficient over 0.60. The relationship was significant in plant physiology. Such relationship between ring width and temperature was also observed at the north slope and upper tree line at the south slope of Altai Mountains. The running correlation analysis between 31 a mean temperature in June and standardized chronology of tree-ring width showed that, with the temperature uprising, the correlation coefficient decreased slightly. The highest correlation coefficient is at the lower temperature stage before 1960s. In general, tree-ring width responded stably to the mean temperature in June. There seems no obvious “divergence response” in the south slope of Altai Mountains. The summer temperature was increasing slowly, in which the mean temperature in June at sampling site increased slightly, not enough to switch the growth response of *Larix sibirica* Ledeb.. However, the response of tree-ring width to temperature would change under the continued warming and drying pressures. The year of 1992 is an abnormal response year, that whether it is relative to Pinatubo volcano eruption is unknown.

Key Words: Kazakhstan; Altai Mountains; *Larix sibirica* Ledeb.; tree ring; divergence response

近百年来的全球升温已成为不争的事实^[1],而全球气候变化对生态系统的影响是一个重大的科学问题。大量的研究利用模拟实验、定位观测和样带研究、模型模拟等方法研究森林生态系统对全球气候变暖的响应^[2]。在北半球中高纬度地区,树轮学家发现随着全球温度的升高,原本对温度敏感的树轮资料在 20 世纪后期对温度不再敏感^[3-11]。响应分异产生的原因可能有:水分胁迫,树木与气候要素的非线性和阈值效应,去趋势的影响,环境污染影响,立地条件差异^[3]。此前,我国的树轮研究工作主要是分析不同气候条件和环境梯度树轮宽度对气候要素的响应差异^[12-13],较少分析同一立地条件下树轮资料对气候响应的特征分析^[14]。

阿尔泰山分布着大片的西伯利亚落叶松原始森林,俄罗斯学者等较早在阿尔泰山北坡开展了树轮气候学研究^[15-16]。1980 年代,我国的李江风、袁玉江等就在中国境内阿尔泰山南坡东部开展了大量的树轮气候和水文学研究,建立该地区的树轮年表序列,重建了温度、降水和额尔齐斯河径流量等气候水文长序列^[17]。但由于采样条件的限制,早期的采样点大多位于海拔较低的森林下限,这里树轮宽度的主要限制因子多为降水^[18]。近几年来,通过对该区域森林上限区域的树轮研究发现,位于阿尔泰山南坡森林上限的西伯利亚落叶松宽度主要受生长季温度的影响^[19]。但由于中国西部气象资料时段较短,且由于经济社会发展,气象资料受城市化影响较大^[20],不利于进行树轮响应分异的研究。位于哈萨克斯坦境内的阿尔泰山南坡西部是树轮气候研究的一个空白区域,本文研究区内卡通卡拉盖气象站附近人口密度小,城市化水平低,其气象资料更能真实地反映自然背景下的气候变化。此外,该站器测气象资料时段较长,可以开展不同时段气候背景下的树轮气候响应对比分析。在全球和区域气候变暖的背景下,这一区域的树木的径向生长对气候要素的响应如何,是否也存在对温度的响应分异问题? 本文建立了阿尔泰山南坡森林上限的西伯利亚落叶松树轮宽度年表,分析气象站 1932 年以来的气候变化特征,在此基础上,分析树轮宽度对 75a 以来(1932—2006 年)气候要素的响应特征,特别是对 6 月温度变化的响应。为下一步利用树轮资料进行历史气候序列重建打下基础,对于认识全球气候变化对森林生态系统的影响也具有重要的意义。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

本文所选的研究区位于哈萨克斯坦境内阿尔泰山南坡,为典型的大陆性气候条件。阿尔泰山全长 2 100km,位于中国、哈萨克斯坦、俄罗斯和蒙古交界段,呈西北—东南走向。该区域的降水主要来源于大西洋的西风气流以及北冰洋穿越山隘的气流带来的水汽,由于山地的抬升作用,山区降水较为丰富,阿尔泰山山区

降水由西北向东南递减^[21]。山区森林资源丰富,在海拔 1 400—2 400 m 的山区最大降水带分布有西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ledeb.),该树种耐干旱、严寒,一般 5 月份发芽,6—7 月份为速生期,9 月开始落叶进入休眠期。

1.2 气象资料

本文所用的气象资料来源于阿尔泰山南坡卡通卡拉盖气象站(49°10' N,85°37'E,海拔 1 071 m),采用 Mann-Kendell 方法和 Double-mass analysis 方法对该站的温度和降水资料进行了均一性检验^[22-23],结果表明温度和降水记录无随机突变和明显不均匀分布情况。该站位于阿尔泰山南坡山区谷地(图 1),多年平均降水量为达到 447mm,而年均温仅为 1.6℃,属于大陆性气候。图 2 为该站多年月平均温度和降水分布情况,可以看出降水高峰出现在 5—8 月,7 月平均温度最高(16.5℃),6 月平均温度为 14.7℃。

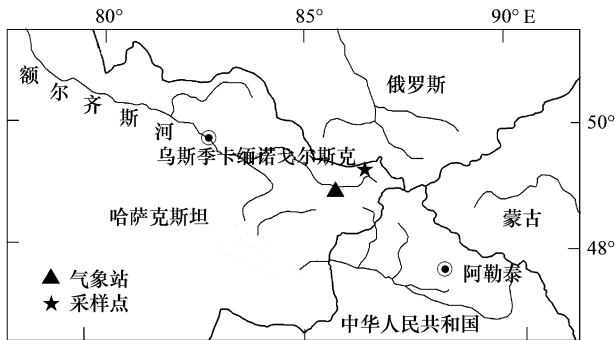


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Map of study area at Altai Mountains. Meteorological stations was shown as black triangle(▲), and tree ring sampling site was shown as black star(★)

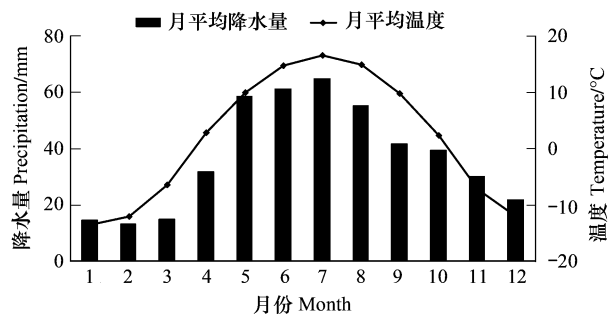


图 2 卡通卡拉盖气象站多年月平均温度和降水分布

Fig.2 Mean monthly precipitation and temperature of Katongkalagai station

1.3 树轮资料

2007 年 8 月下旬,在哈萨克斯坦境内阿尔泰山南坡的森林上限附近采集树芯标本(图 1),树种为西伯利亚落叶松。采样点海拔 2 045 m,接近阿尔泰山南坡西伯利亚落叶松分布的上限,该点与气象站的直线距离约 65 km。共采集 30 棵树,50 个树芯,复本量完全满足树轮气候研究的要求^[24]。将采集的树芯标本按照实验室标准程序进行固定、打磨、查年、测量轮宽,用图像对比程序进行交叉定年,用 COFECHA 程序进行交叉定年检验^[25],剔除其中年代太短和与主序列相关较差的序列,最后采用 ARSTAN 年表研制程序^[26]建立树轮年表,采用负指数或线性函数拟合树木的生长趋势,去除与树龄相关的生长趋势的影响,再对去趋势序列以双权重平均法进行合成,得到 3 种树轮宽度年表(表 2)。树轮序列的长度为 389a(1619—2007 年),可靠年表序列长

表 1 哈萨克斯坦阿尔泰山南坡树轮采样点概况

Table 1 General situation of south slope of Altai Mountains of Kazakhstan

采点名称 Sampling site name	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	样本量(株/芯) Sample size
牙孜乌耶湖 Yaziwuye Lake (YZW)	49°33'41.7"E	86°16'59.0"N	2045	30/50

表 2 树轮宽度标准年表统计特征

Table 2 Statistical features of tree ring width standardized chronologies

采样点 Sampling site	序列长度 Serial length/a	树内相关系数 Correlation within trees	1 阶自相关系数 Autocorrelation order 1	平均敏感度 Mean sensitivity	缺轮率/% Missing ring percentage
牙孜乌耶湖 YZW	389	0.52	0.45	0.20	0.22

度(子样本信号强度 >0.85)为 310 a (1698—2007 年),缺轮率为 0.22%。宽度标准化年表的平均敏感度达到 0.20,一阶自相关系数为 0.45,环境对树木径向生长的影响存在一定的滞后效应。采样点树轮宽度变化的一致性较好,树间相关系数达到 0.52。本文在分析树轮宽度资料对气候变化的响应时,采用了树轮宽度标准化年表。

1.4 方法

利用一元线性拟合方法,以时间为自变量,气候要素为因变量,建立一元回归模型,分析温度和降水资料变化趋势。计算模拟序列与原序列的相关系数、气候要素变化倾向率。

采用相关函数直接计算树木年轮指数与卡通卡拉气象站 1932 年以来的上年 9 月份到当年 9 月份各月的平均温度和降水资料之间的相关系数,反映单个气候要素与树木径向生长的相关关系。为了了解树轮宽度对气候变化响应的变化特征,以 31 a 为时间窗口,从 1932—1962 年开始逐年向后滑动,计算牙孜乌耶湖树轮宽度标准化年表与卡通卡拉盖气象站当年 6 月份的平均温度的相关系数的变化。

2 结果

2.1 温度和降水的变化特征

1932 年以来,卡通卡拉盖气象站的年降水量呈微弱的降低趋势,以 $8.3 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率递减(图 3),没有达到 0.05 的显著性水平。而增温趋势较为明显,以 $0.208 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 的速率递增(图 3),达到了 0.01 的显著性水平。为了了解不同季节温度变化对年平均温度上升的贡献,按季节(12、1、2 月份代表冬季,3、4、5 月份代表春季,6、7、8 月份代表夏季,9、10、11 月份代表秋季。)分析温度的变化趋势(图 4),发现增温最为明显的是冬季(增温速率为 $0.348 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$),其次是秋季($0.244 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$),夏季增温最慢($0.108 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$),其中春季和夏季的增温速率达到了 0.05 的显著性水平,秋季和冬季增温速率达到了 0.01 的显著性水平,这与全球增暖主要发生在冬季的结论是一致的^[27]。

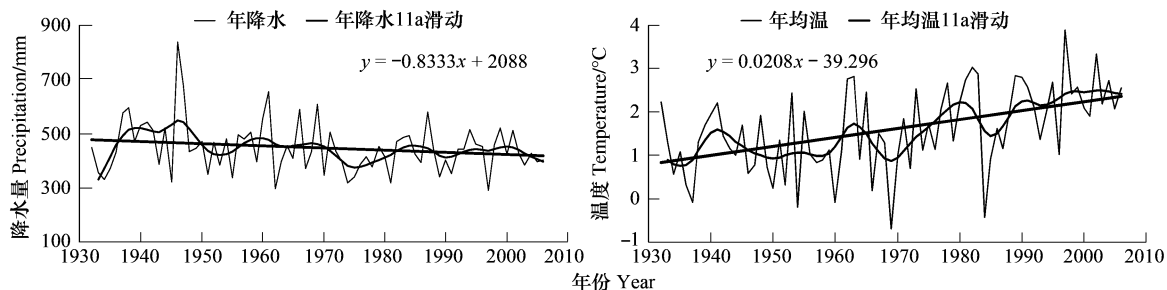


图 3 卡通卡拉盖气象站年平均温度和降水量的变化

Fig. 3 Annual precipitation and mean temperature of Katongkalagai weather station

2.2 树轮宽度对气候变化的响应

2.2.1 对气候的响应的特征及其生理意义

采用相关函数分析树轮标准化年表对上年 9 月至当年 9 月份温度和降水的响应特征。从图 5 可以看出,树轮资料与生长季前期的温度(当年 1—4 月份)呈微弱的负相关,与生长季温度(5—7 月份)正相关,其中与当年 6 月份温度显著正相关,相关系数达到 0.615,与 5—6 月份降水负相关(没有达到 0.01 的显著性水平),而与生长季前期的降水没有较为明显的关系。可以看出,在阿尔泰山南坡西伯利亚落叶松分布的上限区,制约树木径向生长最主要的气象因子为生长季初期的温度。由于 6 月份为西伯利亚落叶松的生长的关键阶段,是速生期的开始,这一时段也是阿尔泰山南坡冰雪融水补给河流的主要时期,河流最大径流量出现在 5—6 月份^[28],同时山区降水相对平原区也较为丰沛。在水分条件充足的情况下,较高的温度有利于植物的光合作用,延长生长期,形成较宽的年轮;反之,低温会降低光合作用效率,强冷空气甚至会冻死刚开始生长的幼枝嫩叶,形成窄轮。据此也可以推断,树轮宽度指数与 5—6 月份降水的负相关是因为降水通常伴随冷空气入侵、

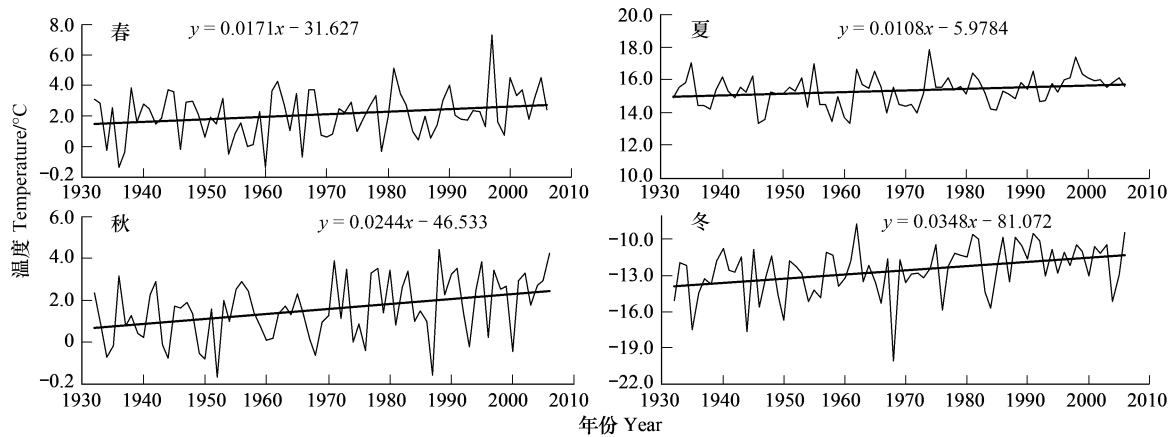


图4 卡通卡拉盖气象站各季节平均温度变化

Fig. 4 Seasonal mean temperature changes of Katongkalagai weather station

云量的增多和太阳辐射的减少,导致温度较低。因此,研究区西伯利亚落叶松树轮宽度与当年6月份温度的显著正相关是具有明确树木生理学意义的。在新疆阿尔泰山区^[17,19]、阿尔泰山北坡^[29]和川西高原^[30]都发现了树轮宽度与6月份温度的显著正相关关系。

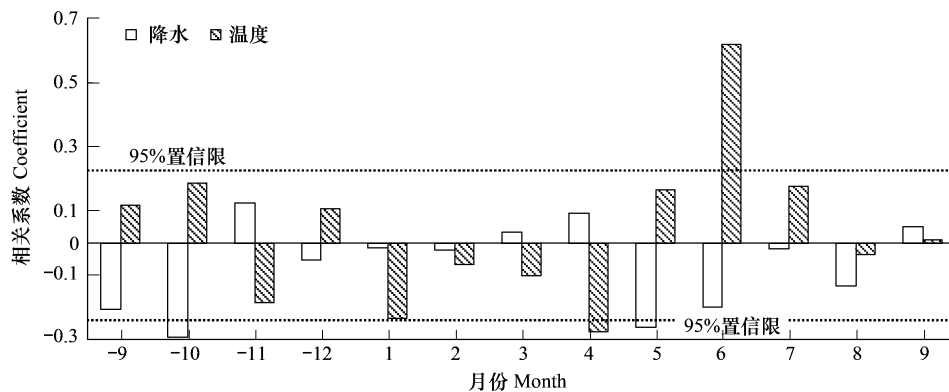


图5 树轮宽度标准化年表与上年9月至当年9月温度和降水的相关系数

Fig. 5 The coefficients between standardized tree ring width chronology and precipitation and temperature of last September to current September

-9, -10, -11, -12 分别代表上年9月份到12月份

2.2.2 对气候变化的响应

如前所述,1932年以来,卡通卡拉盖气象站的温度和降水都发生了明显的变化,在近百年来气候变化的背景下,树轮宽度对气候要素的响应方式是否也发生了变化。6月份平均气温为树轮资料对温度响应最显著的时段。采用滑动相关的方法得到1932年以来各时段树轮宽度与当年6月份的平均温度相关系数的变化序列,可以看出树轮宽度对温度变化的响应特征。从图6b可以看出,6月份平均温度的31 a滑动平均序列与树轮年表和6月份平均温度的相关系数序列呈反向变化趋势。在早期,6月份平均温度最低,树轮宽度对6月份平均温度的响应最为显著,标准化年表与6月份平均温度的相关系数最高(达到0.70以上),而在6月份温度较低的阶段,树轮宽度对6月份平均温度的响应减弱。但总体来说,树轮年表与6月份平均温度相关系数的降低趋势并不明显。其中1977年对应序列的相关系数最低,仅为0.50,其余年份对应序列的相关系数都在0.55以上。

3 讨论和结论

在区域温度和降水等气候要素发生了显著变化的条件下,树轮宽度对 6 月份的温度响应在早期虽有一定程度的减弱,但变化并不明显,且没有持续减弱的趋势,相关系数一直保持在 0.60 左右。树轮宽度对 6 月份平均温度的响应较为稳定可能是以下原因:(1)虽然 1932 年以来研究区的温度呈显著的上升趋势,但升温主要发生在冬季,夏季升温速率较低,6 月份的升温速率仅为 $0.099\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。(2)采样点温度较低,根据海拔每上升 100 m 温度降低 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的规律估算,采样点 6 月份的平均温度约为 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即使研究区 6 月份的温度有一定的上升,但目前并没有超过西伯利亚落叶松生长的温度阈值^[31],因此树轮宽度与 6 月份平均温度的相关系数并没有发生显著的变化。虽然在目前气候变暖的条件下,树轮宽度对温度的响应并没有出现明显的变化,但如果未来区域降水量持续减少,且变暖的趋势持续,特别是夏季升温,可能会导致 6 月份的温度可能上升至阈值以上。同时,生长季较少的降水 and 高温引起的蒸腾加剧和蒸发量增大还可能造成生长期的水分赤字,造成植物生长的干旱胁迫^[32],从而改变树轮宽度对气候响应的方式。

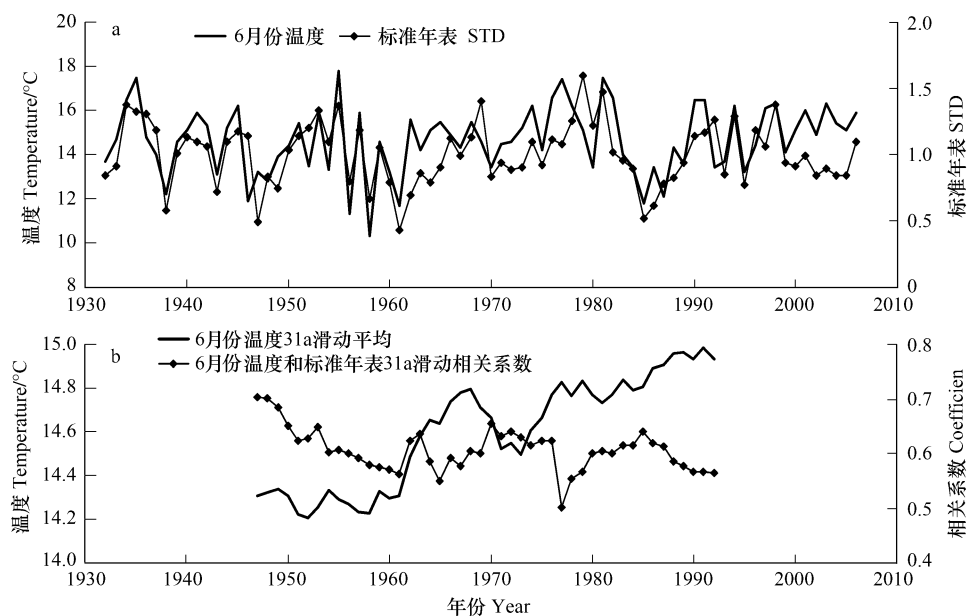


图6 树轮宽度标准化年表对温度变化的响应

Fig. 6 Climate response of tree ring width standardized chronology to rising temperature

a 为牙孜乌耶湖标准年表序列和卡通卡拉盖气象站 6 月份平均温度序列;b 为 6 月份温度和标准年表的 31a 滑动相关系数

值得注意的是,1962—1992 年间的轮宽指数与温度序列的相关系数出现了显著变化,从 0.62 (1961—1991 年)降至 0.50 (1962—1992 年),从图 6a 可以看出,这是由于 1992 年响应异常造成的:当年 6 月份温度较低,但对应的树轮宽度指数是一个相对高值,出现了树轮宽度对 6 月份温度的响应异常。表明这一年树轮生长可能与 6 月份气温以外的其他因素有关。有研究指^[33-35]出,火山爆发后的散射光增加能通过增加冠层光利用效率提高植物的光合作用速率,这一年的响应异常是否与前一年的 Pinatubo 火山爆发有关,还有待进一步的深入研究。从图 6a 标准年表序列和 6 月份平均温度序列关系可以看出,1999 年之前,二者除了在个别年份不太吻合以外,其他年份都对应较好,且变化趋势一致。1999 年之后,虽然二者变化趋势一致,但 6 月份平均温度与标准化年表指数之间出现了较为明显的距平差异。1999—2006 年 6 月份的平均温度为 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,比 1932—1998 年 6 月份平均温度高 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,且 1979—1999 年之后 6 月份平均温度序列与标准年表的序列相关系数呈下降趋势(0.6 以下)。在 1999 年以来 6 月份温度持续上升的条件下,树轮宽度并没有相应地线性增加。因此在这一区域,如果未来 6 月份持续升温,可能会导致树轮宽度对气候响应方式的改变。

致谢:感谢哈萨克斯坦东哈萨克斯坦州水文气象中心瓦洛加等人在野外采样过程中给予的大力协助。

References:

- [1] IPCC. Paleoclimate. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth AR of the IPCC. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2007: 466-481.
- [2] Fang J Y. Eds. Global Ecology-Climate Change and Ecological Response. Beijing: Education Press. Springer Press, 2000: 26-29.
- [3] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P. On the Divergence Problem' in northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. Global and Planetary Change, 2008, 60: 289-305.
- [4] Jacoby G C, D'Arrigo R. Tree-ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. Global Biogeochemistry Cycles, 1995, 9: 227-234.
- [5] Briffa K, Schweingruber F, Jones P, Osborn T. Reduced sensitivity of recent tree growth to temperature at high northern latitudes. Nature, 1998, 391:678-682.
- [6] Wilmking M, Juday G, Barber V, Zald H. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at tree line in Alaska through temperature thresholds. Global Change Biology, 2004, 10, 1724-1736. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00826.
- [7] Wilmking M, D'Arrigo R, Jacoby G, Juday G. Divergent growth responses in circumpolar boreal forests. Geophysical Research Letters, 2005, 32, L15715. doi:10.1029/2005GLO23331.
- [8] Carrer M, Urbinati C. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. New Phytologist, doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01703.x.
- [9] Büntgen U, Frank D, Wilson R, Carrer M, Urbinati C, Esper J. Testing for tree-ring divergence in the European Alps. Global Change Biology, 2008,14, 2443-2453, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01640.x.
- [10] Craig Loehle. A mathematical analysis of the divergence problem in dendroclimatology. Climatic Change. 2009,94:233-245 Doi 10.1007/s10584-008-9488-8.
- [11] Wilson R, D'Arrigo R, Buckley B, Büntgen U, Esper J, Frank D, Luckman B, Payette S, Vose R, Youngblut D. A matter of divergence-tracking recent warming at hemispheric scales using tree-ring data. Journal Geophysical Research, 2007,112:D17103.1 D17103.17.
- [12] Wang T, Ren H B, Ma K P. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China. Trees. 2005, 19: 735 - 741 Doi 10.1007/s00468-005-0003-9.
- [13] Peng J F, Gou X H, Chen F H, Zhang Y X, Liu P X, Zhang Y, Fang K Y. Horizontal variations of climate response of Qilian Juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anemaqen Mountains. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 742-752.
- [14] Zhang Y X, Wilmking M, Gou X H. Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China. Plant Ecology, 2008, Doi10.1007/s11258-008-9478.
- [15] Myglana VS, Oidupaab O C, Kirdyanov A V, Vaganov E A. 1929-year chronology for the Altai-Sanyan Region (Western Tuva). Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia, 2008, 36(4):25-31.
- [16] Ovtchinnikov D, Adamenko M, Panushkina I. A 1105-year tree-ring chronology in Altai region and its application for reconstruction of summer temperatures. Geolines, 2000, 11: 121-122.
- [17] Li J F, Yuan Y J, Zhou W S. Dendroclimatology and Dendrohydrology Research in Xinjiang. Beijing: Meteorology Press, 1989:1-9, 66-73, 81-86, 98-103, 116-130.
- [18] Li J F, Yuan Y J, Zhang Z J, Xu R Z. Response function of dendrochronology in Altai Mountain. Journal of Xinjiang University, 1989, 6(1):97-104.
- [19] Zhang T W, Wei W S, Yuan Y J, Yu S L, Yang Q, Shang H M. Analysis of the tree-ring chronological characteristics in the west of Altay. Journal of Desert Research, 2007, 27(6):1040-1047.
- [20] Peng S L, Zhou K, Ye Y H, Li J. Research progress in urban heat island. Ecology and Environment, 2005, 14(4):574-579.
- [21] Nuerlan H. Hydrological features of rivers in Altai prefecture. Hydrology, 2001,21(4):53-55.
- [22] Mann H B. Non-parametric test against trend. Econometrika, 1945, 13:245-259.
- [23] Kohler M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological record and for making required adjustment. Bulletin America Meteorology Society, 1949, 30:188-189.
- [24] Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976:258-270.
- [25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43:69-75.
- [26] Cook E R. Methods of Dendrochronology. The Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,1990:1-200.
- [27] Yan Z W, Zhang M L. On the trends of temperature and daily range in China. Chinese Science Bulletin,1993, 38: 54-58.

- [28] Shen Y P, Wang G Y, Lan Y C, Han P, Gao Q Z, Wang S D. Hydrological processes responding to climate warming in the upper reaches of Kelan River Basin with snow-dominated of the Altay Mountains Region, Xinjiang, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29 (6): 845-854.
- [29] Panyushkina I P, Ovtchinnikov D V, Adamenko M F, Mixed response of variability in Larch tree-ring chronologies from upper tree-lines of the Russia Altai. *Tree-Ring Research*, 2005, 61 (1): 33-42.
- [30] Shao X M, Fan J M. Past climate on West Sichuan Plateau as reconstructed from ring width of dragon spruce. *Quaternary Sciences*, 1999, (1): 81-89.
- [31] Vaganov E A, Hughes M K, Kirdyanov A V, Schweingruber F H, Silkin P P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in Subarctic Eurasia. *Nature*, 1999, 400: 149-151.
- [32] B ntgen U, Frank D, Schmidhalter M, Neuwirth B, Seifert M, Esper J. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees*, 2006, 20: 99-110.
- [33] Govvanna B, Paolo C, Matthias S, Rolf T W S, Sandro S, Francesca C M. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1122-1137, doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01350.x.
- [34] Cohan D S, Xu J, Greenwald R, Bergin M H, Chameides W L. Impact of atmospheric aerosol light scattering and absorption on terrestrial net primary productivity. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2002, 16 (4), 1090, doi:10.1029/2001GB001441.
- [35] Gu L, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P, Boden T A. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299: 2035-2038.

参考文献:

- [2] 方精云. 全球生态学——气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 施普林格出版社, 2000: 26-29.
- [13] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 张永香, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应. *地理学报*, 2007, 62 (7): 742-752.
- [17] 李江风, 袁玉江, 周文盛. 新疆年轮气候年轮水文研究. 北京: 气象出版社, 1989: 1-9, 66-73, 81-86, 98-103, 116-130.
- [18] 李江风, 袁玉江, 张治家, 徐瑞珍. 阿尔泰山树轮年表的响应函数. *新疆大学学报*, 1989, 6 (1): 97-104.
- [19] 张同文, 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 杨青, 尚华明. 阿勒泰西部树轮年表特征分析. *中国沙漠*, 2007, 27 (6): 1040-1047.
- [20] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 栗娟. 城市热岛效应研究进展. *生态环境*, 2005, 14 (4): 574-579.
- [21] 努尔兰·哈再孜. 阿勒泰地区河流水文特征. *水文*, 2001, 21 (4): 53-55.
- [27] 严中伟, 章名立. 当前我国温度及其日较差的变化趋势. *科学通报*, 1993, 37: 1295-1298.
- [28] 沈永平, 王国亚, 苏宏超, 韩萍, 高前兆, 王顺德. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应. *冰川冻土*, 2007, 29 (6): 845-854.
- [30] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. *第四纪研究*, 1999, (1): 81-89.