

DOI: 10.5846/stxb201709261737

牛豪阁, 张芬, 于爱灵, 王放, 张军周, 勾晓华. 祁连山东部青杆年内径向生长动态对气候的响应. 生态学报, 2018, 38(20): - .

Niu H G, Zhang F, Yu A L, Wang F, Zhang J Z, Gou X H. Intra-annual stem radial growth dynamics of *Picea wilsonii* in response to climate in the eastern Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

祁连山东部青杆年内径向生长动态对气候的响应

牛豪阁, 张 芬, 于爱灵, 王 放, 张军周, 勾晓华*

兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要: 树木径向生长对气候因子的响应是树轮气候学的基础。在我国西北地区, 虽然已有大量的树轮-气候响应研究, 但是响应分析多基于数理统计结果, 缺乏对树木生长过程的理解。基于此, 于 2013 年到 2015 年在祁连山东部吐鲁沟国家森林公园内通过 Dendrometer 连续监测了树轮气候重建中常用树种青杆的径向生长, 通过平均值法提取 2013 到 2015 年生长季内不同时间尺度(1 天、7 天、10 天)的平均径向生长量及对应时间段的平均气候状况。不同时间尺度径向生长量和气候因子的相关分析结果表明, 时间尺度的延长削弱了树干水分昼夜变化的干扰, 但水分仍然是青杆径向生长的限制因子。为了进一步分析青杆径向生长与气候关系随时间的变化情况, 以 31 天为窗口将日径向生长量与气候要素每隔一天进行滑动相关, 结果显示: 5、7 月青杆的径向生长与降水的关系稳定, 都呈显著正相关, 但是 6 月降水的年际变率较大, 导致树木可利用水分的变幅也较大, 因而树木径向生长与 6 月水分的响应关系不稳定, 存在较大的年际差异, 而这可能是一些树轮-气候响应研究中轮宽与 6 月降水关系不显著的原因。

关键词: 青杆; 径向生长动态; 气候响应; 祁连山东部; dendrometer

Intra-annual stem radial growth dynamics of *Picea wilsonii* in response to climate in the eastern Qilian Mountains

NIU Haoge, ZHANG Fen, YU Ailing, WANG Fang, ZHANG Junzhou, GOU Xiaohua*

College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Ministry of Education Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou 730000, China

Abstract: The responses of stem radial growth to climate are the basis of dendroclimatology. There is much research on the tree radial growth response to climate change in northwest China. However, most studies are based on statistical analysis, lacking an understanding of tree growth processes. Therefore, two *Picea wilsonii* trees were continuously monitored with a dendrometer in the Tulugou National Forest Reserve in the eastern Qilian Mountains from 2013 to 2015 in this study. We extracted the stem radial increment at different time scales (1 day, 7 days, 10 days) and mean climate factors. Our studies have shown that the extension of the time scale weakens the disturbance of diurnal variation in the trunk water, but the available water status is still a major limiting factor for stem radial growth. To further understand the major climatic factors affecting radial growth, we calculated the moving correlation coefficient between the daily radial growth and the daily meteorological data (temperature, precipitation, VPD) within a window of 31 days. We found that the stem radial growth was significantly positively correlated with precipitation in May and July during the three years, but the change of available water was large to the radial growth of *Picea wilsonii* during the three years. Thus, the relationship between the stem radial growth and precipitation in June was unstable. This may be the reason why the relationship between tree-rings and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771046); 中央高校基本业务科研项目(lzujbky-2017-ot19, lzujbky-2016-276, lzujbky-2017-it86)

收稿日期: 2017-09-26; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xhgou@lzu.edu.cn

precipitation in June is not significant in some studies on the climate response of tree-rings.

Key Words: *Picea wilsonii*; stem radial growth; climate response; the eastern Qilian Mountains; dendrometer

树木年轮因其具有时间序列长、定年准确、分辨率高、复本量大、连续性强、地域分布广泛的特点^[1],在我国西北地区的气候重建研究中有广泛应用^[2-5]。树轮—气候响应研究是树轮气候重建的基础^[6],但是这一研究主要基于树轮宽度和气候要素的数理统计关系^[7-8],缺乏对树木生理基础的研究。而且在温带地区,雨季到来时间和生长季温度的变化会显著影响形成层活动,但是年际间的轮宽却仍可能保持不变^[9-10],这导致基于轮宽的气候响应分析会覆盖生长季内各月的气候信息,不能揭示树木短期的径向生长变化与气候要素的关系。因此需要引入生长监测的手段,在更高分辨率的基础上(生长季内各月)分析树木径向生长对气候的响应特征,进而分析被监测树种的生存策略^[11-13]。

2010 年以来,该地区对树木生长的监测逐步建立起来,并取得丰硕成果^[14-17]。但是,基于 Dendrometer 监测的树木径向生长包括细胞吸水膨胀失水收缩的可逆过程和细胞膨胀分裂的不可逆过程^[18],且通过 Dendrometer 监测的是树干的直径和圆周变化而不是直接的木材形成,很难将真正的形成层细胞生长和由水分波动导致的膨胀收缩分离开^[19]。Deslauriers 等对意大利阿尔卑斯山东部不同海拔高度云杉和落叶松的监测研究显示,在低海拔地区(1020m),利用 10d 时间尺度的 Dendrometer 数据所确定的生长季与微树芯结果有很好的 consistency^[12];Köcher 等通过径向生长监测的方法研究了 5 种阔叶树径向生长对环境要素的响应,发现在 7d、21d 时间尺度下提取的径向生长量与影响树木生长的主要因素—相对湿度的显著相关关系更加稳定^[20]。这些研究说明通过延长时间尺度可以削弱细胞水分日波动的影响,更加准确地分析气候要素对树木径向生长的影响。且 Li 等^[21-22]在藏东南色季拉山的监测研究发现,在一周的时间尺度上就可以监测到形成层细胞的径向生长活动;Mäkinen 等也发现一周时间尺度的微树芯采样可以记录到木质部细胞的形成^[23]。基于此,本研究将时间尺度延长到 7d、10d,在尽量减少树干水分波动干扰的基础上,分析青杆径向生长与气候要素的关系。

为了避免监测时间较短导致树木径向生长对气候的响应结果不可靠,我们对吐鲁沟青杆进行了连续 3 年的监测(2013—2015),目的在于:(1)研究不同时间尺度下树木径向生长对气候要素的响应差异;(2)研究 3 年生长季内各月气候状况与树木径向生长的关系。

1 研究区概况

吐鲁沟国家森林公园(36°40′—36°44′N, 102°36′—102°46′E;海拔 1950—3300 m)位于兰州市永登县连城镇(图 1),位于祁连山东部的大通河流域,属温带大陆性气候,青杆分布的西界。该地区的年日照时数为 2655.2 h,年太阳总辐射为 469 kJ/cm²,年平均气温 7.4℃,无霜期 125—135 d,年蒸发量为 1542 mm,圈湾、苗圃年降水量分别为 679 mm 和 657 mm,主要集中于 4—9 月,7 月降水最多^[24]。

保护区内随着海拔上升,植被呈现明显的垂直分带特点:海拔 2100 m 以下主要分布山杨(*Populus davidiana*)等阔叶树;随海拔升高依次为油松(*Pinus tabulaeformis*)、青杆(*Picea wilsonii*)和青海云杉(*Picea crassifolia*),在青海云杉林内分布有红桦(*Betula albo-sinensis*)、糙皮桦(*Betula Betulaceae*),海拔 3000 m 以上乔木为祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),灌木为杜鹃(*Rhododendron spp.*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)等等。青杆监测点位于吐鲁沟内的苗圃(36°41′32.57″N, 102°44′22.92″E,海拔 2145 m),坡度为 20°,郁闭度在 0.3 左右,坡向为半阳坡。

2 数据采集和处理方法

2.1 青杆径向生长数据采集处理

选取长势良好的青杆 2 棵(附近无径流、无工程干扰),两棵样木的树高为 24 m 左右,胸径分别为 25.4、

30.8cm,树龄分别为 80、94a。我们在 2013—2015 年使用点触式树木径向生长监测仪(Point Dendrometer, Ecomatic Germany; 型号:DR; 精度: $\pm 2\mu\text{m}$)监测树木茎干的年内变化。首先,在树干胸径高度处剥去树皮,以便减少树皮水分变化对树干径向监测的干扰。然后,安装 Dendrometer,并将仪器的记录时间间隔设置为 30min,一天共记录 48 个数据^[5]。Dowens 根据树木径向的收缩和膨胀将树木的径向变化分为 3 个阶段:收缩阶段、恢复阶段和增长阶段,从上一个最大值到当前最小值的这段时间是收缩阶段,从当前最小值膨胀到上一个最大值的时间是恢复阶段,继续膨胀到下一个最大值的时间称为增长阶段^[25]。Deslauriers 将树木径向生长分为收缩阶段、膨胀阶段和径向增长阶段,该划分方法将恢复和增长阶段合并为膨胀阶段^[12]。根据这些阶段划分可以计算出树干一天的收缩量、膨胀量、增长量,进而提取树木的径向生长量。提取方法主要有 3 种:平均值法^[26]、最大值法^[27]、周期法^[25]。Deslauriers 对比发现 3 种方法提取的径向生长量有很好的 consistency^[12]。因此,本文使用平均值法提取青杆不同时间尺度(1d、7d、10d)的径向生长量,即用下一个时间段径向生长量的平均值减去当前时间段径向生长量的平均值,正值表示存在绝对的径向生长量,负值表示没有径向生长,记为 0。

Gompertz 函数在树木径向生长拟合中有广泛的应用,可以用来确定树木的生长季^[28-29]。本文将每天记录的 48 个数据求平均,得到青杆累积径向生长的日均值序列。通过 t 检验发现两棵树在 3 年生长季中的径向波动($P_{2013}=0.491$, $P_{2014}=0.068$, $P_{2015}=0.056$)和径向增长($P_{2013}=0.136$, $P_{2014}=0.098$, $P_{2015}=0.162$)没有显著的差异,所以将两棵青杆的数据平均,得到青杆的平均生长状况。使用 Gompertz 函数对青杆 3 个生长季每天的径向生长变化进行拟合,然后对拟合函数求导得到青杆在各年的生长速率,并将生长速率大于 $4\mu\text{m}$ 的时段作为青杆的生长季^[5]。

Gompertz 函数模拟公式如下式:

$$Y = A \exp[-e^{(\beta - kt)}]$$

式中, Y 为径向生长原始数据天均值; A 为上渐近线; β 表示与 Y 初始值有关的参数; k 表示内秉生长率; t 表示时间;将拟合方程求导,得到青杆的径向生长速率。

2.2 气象数据采集及处理

在距离树木径向生长监测点 50 m 的空地上安装自动气候站(YM-03),记录气候要素的变化特征,包括空气温度、相对湿度、降水量、太阳辐射、土壤温度及湿度、风速风向等;记录时间间隔为 10min,数据储存在数据采集器中。该监测点 2013—2015 年降水量分别为 576.1、665.8 mm 和 641.8 mm,其中,6—9 月的降水量分别占全年降水量的 77%、64%和 76%。2013、2015 年平均最高气温出现在 8 月(19.31、18.17℃),2014 年平均最高温在 7 月(18.38℃),2013 年平均最低温出现在 1 月(-5.82℃),2014、2015 年平均最低温在 12 月(-5.91℃、-4.03℃)(图 2)。

本文计算了 3 个生长季内不同时间尺度(1d、7d、10d)的平均气温(T)、平均最高温($T_{\max}$)、平均最低温($T_{\min}$)、降水量(P)、平均土壤湿度(SH)、土壤温度(ST)和饱和水汽压亏缺(VPD),用于分析不同的时间尺度气候要素与青杆径向生长的关系。为了分析各气候要素对青杆径向生长的贡献,本文在一天的时间尺度上对二者做了逐步回归分析;同时以 31 天为窗口计算它们的滑动相关系数,分析青杆年内径向生长变化与气候要素关系随时间的变化。

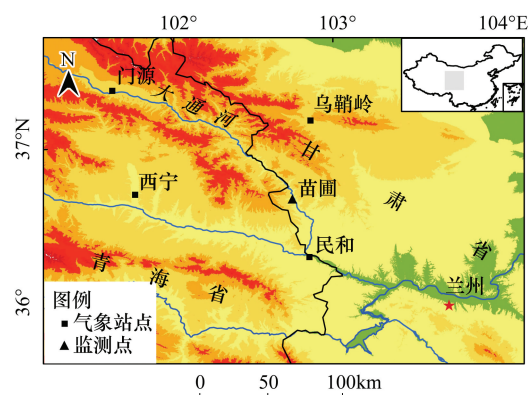


图 1 吐鲁沟青杆监测点

Fig.1 Monitoring point of *Picea wilsonii* in Tulugou

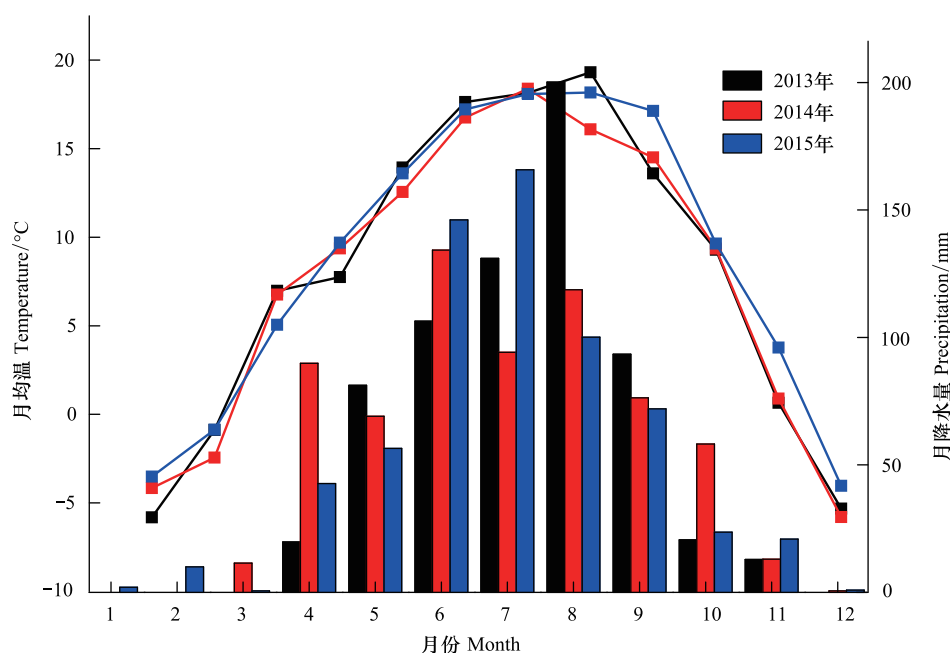


图2 吐鲁沟气象站 2013—2015 的气温、降水变化

Fig.2 Climate diagram for the Tulumou meteorological station during 2013—2015

3 结果

3.1 青杆径向生长模拟

通过 Gompertz 函数对两棵青杆 3 年的平均生长序列进行拟合(图 3),3 年径向生长的拟合方程 R^2 均达到 99%,表明方程很好的拟合了青杆的径向生长变化。结果显示青杆的最大径向生长速率集中在 5 月底 6 月初,2013 到 2015 年的最大生长速率分别在 5 月 26 日、6 月 6 日和 6 月 6 日;2013 年生长开始和结束的时间分别是 4 月 20 日和 8 月 6 日,2014 年分别是 4 月 30 日和 8 月 21 日,2015 年分别是 4 月 27 日和 8 月 24 日。2013 年青杆拟合一开始生长速率就超过了 $4\mu\text{m}/\text{d}$,可能是受到春季复水的影响,即径向生长增加是由细胞吸水膨胀导致,并非有新的形成层细胞生成^[23,30]。

3.2 径向生长量与气候要素的关系

将 3 年生长季内青杆的日径向生长量与气候要素做相关分析,在 1d 尺度上,与降水显著正相关,与最高气温和 VPD 显著负相关。在 7d 和 10d 时间尺度上,青杆的径向生长变化对气候要素的响应模式与 1d 尺度一致,但是相关系数有所降低(图 4)。

利用逐步回归分析建立回归模型,分析各气候要素对青杆径向生长的贡献,也显示降水对青杆的径向生长有主要积极作用,温度尤其是最高温对其径向生长限制明显,方程如下:

$$Y_{\text{SRI}} = 81.873 + 1.682P - 2.026T_{\text{max}} - 0.154\text{VPD}$$

回归方程中的所有参数都通过 0.05 显著性水平检验,具体方程统计信息如表 1:

表 1 回归方程统计信息

Table 1 Statistical information of regression equation

统计量 Statistical information	<i>n</i>	F-value	<i>P</i>	R^2	R^2_{adj}
方程信息 Regression equation information	335	111.36	<0.01	0.502	0.498

为了更加直观地分析青杆径向生长与气候要素的关系,本文将 2013 到 2015 年 3 年生长季内的日径向生长量与对应时段的气温和降水进行了对比(图 5),发现高温少雨的天气条件对应低的径向生长量,低温多雨

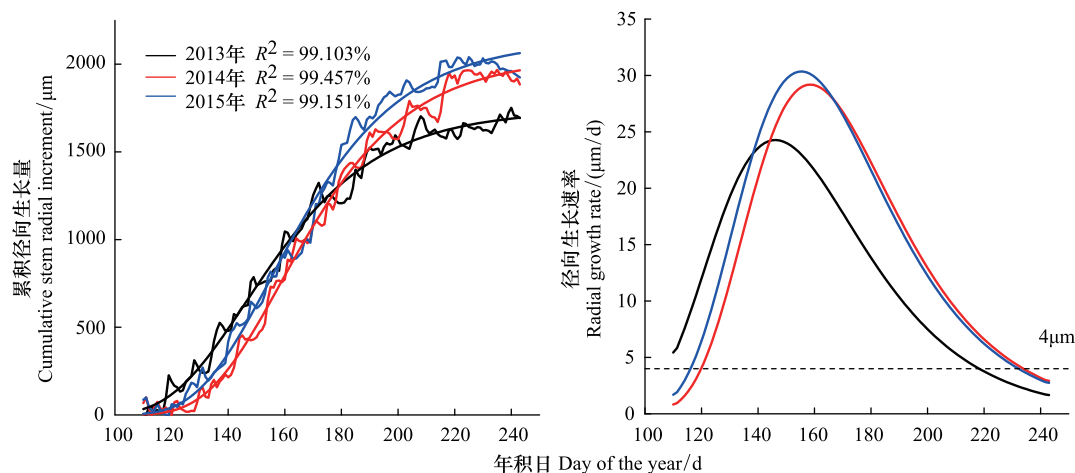


图3 Gompertz 函数模拟的青杆3年径向生长变化及生长速率

Fig.3 Gompertz function modeled curves of cumulative radial variation and radial growth rate from 2013 to 2015

左图细折线表示原始数据的累积径向生长量,粗曲线表示拟合的累积径向生长量

对应高径向生长量,充沛的降水有利于青杆的径向生长。

以上结果显示不同时间尺度的径向生长都与降水有稳定的正相关关系,为了分析青杆年内径向生长与气候要素关系随时间的变化,本文以 31d 为窗口,每隔一天进行滑动,计算了二者在一天时间尺度上的滑动相关系数(图 6)。3 年生长季内各月径向生长与气温、饱和水汽压亏缺(VPD)都为负相关,与降水都为正相关,但是相关系数随时间的推移波动较大,年际间也有很大差异。3 年的径向生长都与 5 月、7 月降水显著正相关,与 6 月降水的相关性波动较大,2013 和 2014 年径向生长与 6 月降水显著正相关,2015 年相关系数急剧降低;31 天滑动降水量显示 2015 年 6、7 月的降水比 2013、2014 年明显要多。且 6 月青杆的径向生长速率较快(图 3),所以 6 月气温降水的波动会对其径向生长产生重要影响。

4 讨论

4.1 青杆不同时间尺度径向生长量与气候要素的响应关系

不同的时间尺度上,青杆的径向生长量都与降水显著正相关,与温度、VPD 负相关,说明该地区水分蒸散严重,其径向生长受到了水分的限制^[1]。但是树木的径向生长包括细胞吸水膨胀、失水收缩的可逆过程和细胞膨胀分裂的不可逆过程^[20,31],在 1d 时间尺度上,细胞从傍晚开始吸水膨胀,持续到早上膨胀结束,白天蒸腾失水收缩^[32],这种细胞失水复水过程会记录水分变化信号,在短时间尺度上,该信号可能会叠加到细胞生长膨胀分裂所揭露的水分变化信号上,所以在 1d 的时间尺度上,径向生长量与水分的相关性较高(图 4)。

为了减弱细胞失水复水对径向生长所记录的气候信号的干扰,本文将径向生长量的时间尺度延长到 7d 和 10d,结果与降水的相关度有所降低,说明通过延长时间尺度可以在一定程度上减弱细胞失水复水的干扰。但相关系数仍在显著度水平以上,证实了该地区树木的径向生长确实受到了水分限制。充沛的降水有利于细

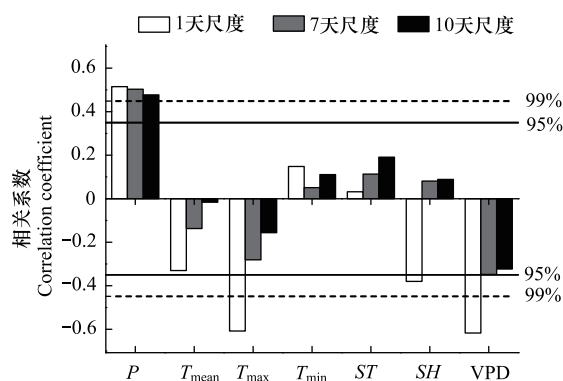


图4 青杆3年生长季内1天、7天和10天径向生长量与气候要素的相关分析

Fig.4 Correlation coefficients between stem radial increment of different time scales

1 天、7 天和 10 天对应的自由度分别为 335、45 和 32,根据自由度 32 设定置信线;P, T_{mean} , T_{max} , T_{min} , ST, SH, VPD 分别表示降水量,平均温,最高温,最低温,土壤温度,土壤湿度,饱和水汽压亏缺

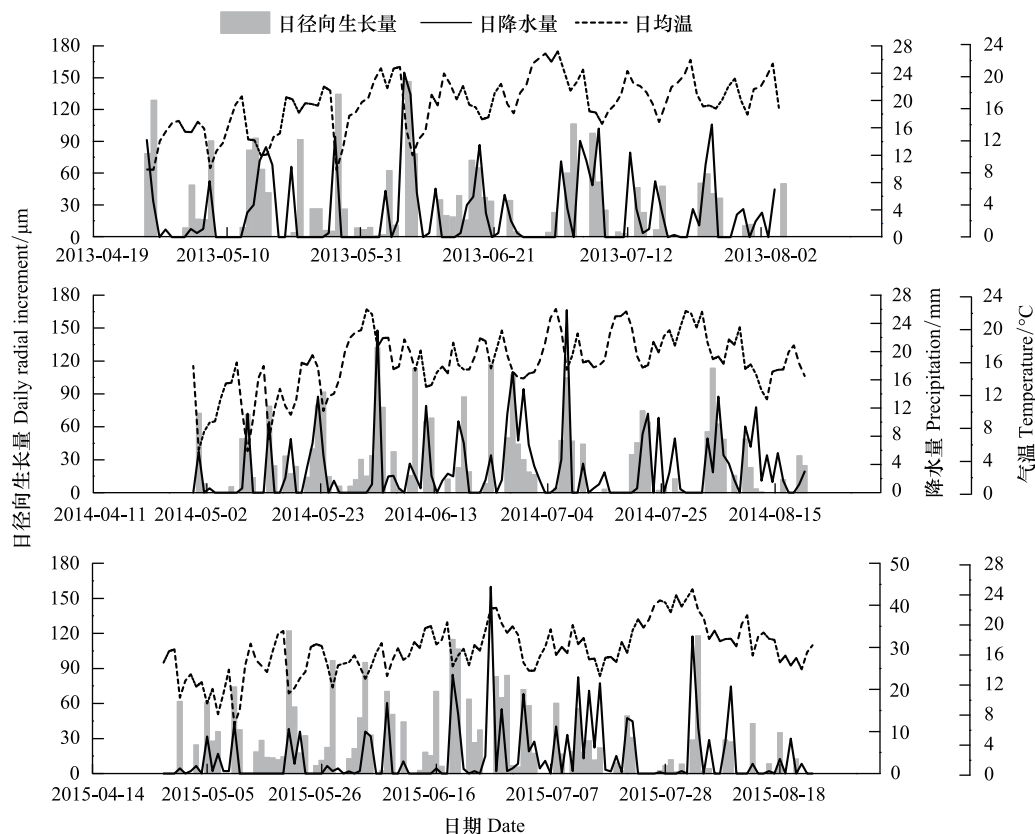


图 5 2013—2015 年生长季内日径向生长量与气温、降水量对比

Fig.5 The comparison between daily stem radial increment and climate factors (temperature, precipitation) in growing season from 2013 to 2015

胞膨胀增大和分裂,从而促进树木的生长^[33-34]。相反,如果极度缺水,会造成细胞膨压减小,影响细胞的新陈代谢^[35],进而抑制树木的径向生长。

4.2 青杆年内径向生长对气候要素的响应

虽然上文已经明确研究区青杆径向生长主要受水分限制,但是由于不同月份径向生长量和水分条件不同,因此青杆径向生长与降水和温度的关系存在很大的年内差异,在一天时间尺度上,以 31d 为窗口,每隔一天进行滑动相关分析,发现 3 年的径向生长与 5、7 月降水显著正相关,与 6 月降水的相关性存在年际差异,2015 年 6 月的径向生长与降水相关不显著(图 6)。

5 月青杆径向生长处于加速阶段,但雨季还未到来,并且温度缓慢回升,树木径向生长受到水分的限制^[36]。7 月降水较多,然而空气温度较高,树木蒸腾旺盛,消耗大量的水分,可能对树木生长造成干旱胁迫。并且长期的野外监测发现该地区 7 月有很多集中在下午的短时降水,7 月温度较高,短时降水后天气转晴,蒸发迅速,导致水分的利用效率较低。我们对 7 月下午的短时降水天数和降水量进行了统计,并将全天都有降水和连续几天都有降水的情况排除在外,结果显示(表 2):3 年 7 月下午的短时降水天数和降水量都占很大比例,尤其是 2015 年不仅下午短时降水的天数超过 50%,其绝对降水量也超过一半。所以即便 7 月的降水较多,但是高温和这种短时降水集中的情况使水分蒸散严重,很大程度上降低了树木对降水的利用效率,导致该时间段的水分仍然是树木径向生长的制约因子。

青杆 3 年的径向生长与降水的关系在 5、7 月保持一致,差异集中在 6 月,并且径向生长模拟的结果显示青杆的最大径向生长率集中在 5 月底 6 月初,其他地区的研究也发现树木径向生长速率最大在春季末期^[12, 37],所以该时段的气候变化对青杆的径向生长有重要影响。本文通过 3 年的监测研究发现 6 月降水与径向生长的关系存在明显的年际差异,二者关系在 2015 年不显著,但是在 2013 和 2014 年显著正相关,我们

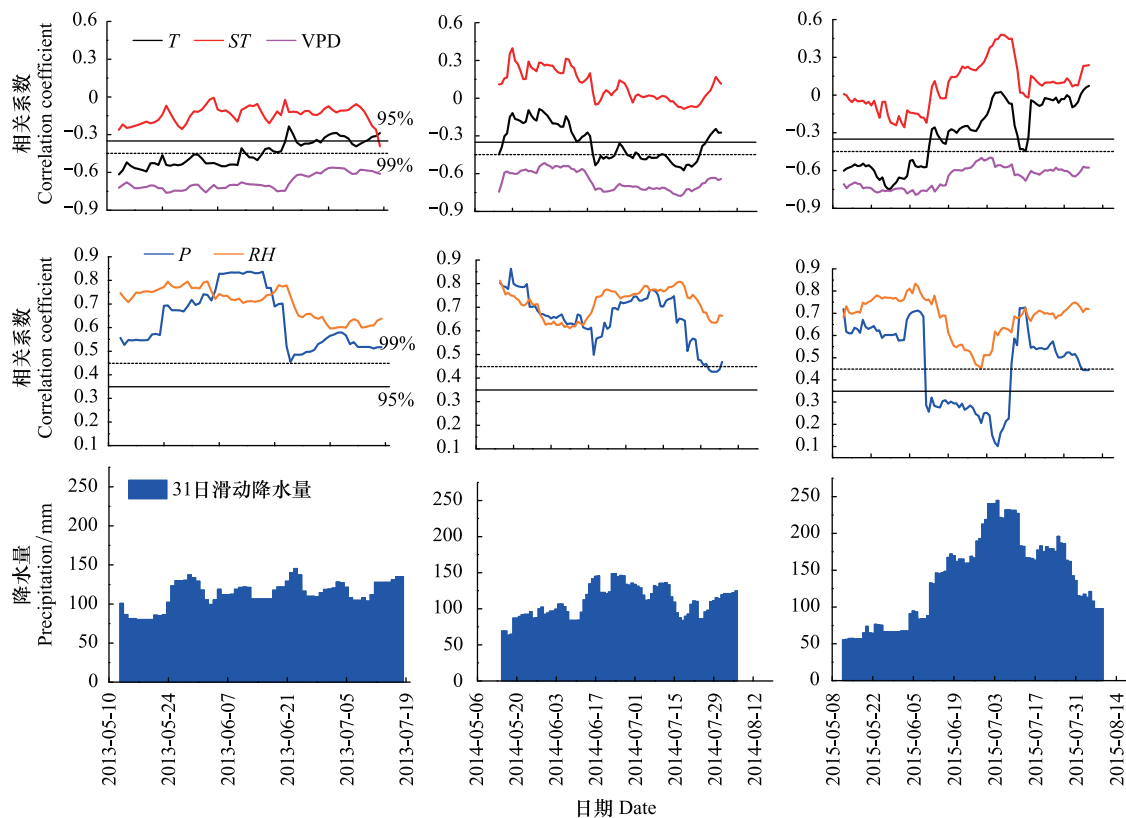


图6 2013—2015年青杆生长季内日径向生长量与饱和水汽压亏缺、温度和降水31天滑动相关

Fig.6 31-day moving correlation between the daily stem radius change and the daily climate factors

红色折线表示天均 VPD 与径向生长量的 31 天滑动相关;黑色折线表示日均温与径向生长量的 31 天滑动相关;蓝色折线表示日降水量与径向生长量的 31 天滑动相关;蓝色柱状图表示 31 天降水量的滑动

认为这与 2013 和 2014 年 6 月降水偏少有关;通过 3 年 6 月份降水量的对比分析发现,2015 年 6 月的降水量最大,可以达到 146.1 mm,2013 和 2014 年 6 月降水相对较少,分别是 106.4、134.3 mm,一定程度上限制了青杆的径向生长。

表 2 2013—2015 年 7 月下午短时降水天数及降水量在整个月中的比例

Table 2 The percentage of the days and amount of short-time precipitation at afternoon in July from 2013 to 2015

年份 Year	2013	2014	2015
下午短时降水天数占总降水天数比例 The percentage of the days of short-time precipitation	50%	47.06%	57.1%
下午短时降水量占总降水量比例 The percentage of the amount of short-time precipitation	31.68%	36.52%	51.69%

2013—2015 三年 6 月降水的年际变率较大,导致树木可利用水分变幅也较大,因而树木径向生长与 6 月水分的响应关系不稳定,这种现象可能会导致一些树轮-气候响应研究中轮宽与 6 月降水的关系在多年统计上不显著。方克艳等研究了兴隆山(距离吐鲁沟将近 300km)和吐鲁沟青杆的树轮气候响应,结果显示青杆的径向生长受到生长季水分的限制,但是都与生长季内 6 月的降水关系不显著^[38-39];且不同地区的监测结果也有很大差异,张瑞波等对天山地区雪岭云杉一年(2014 年)的径向生长监测显示,5 月底到 6 月底的水分状况是其径向生长的主要限制因素^[40];但是贺敏慧等在祁连山地区对祁连圆柏的监测发现其径向生长主要与 5、7 月降水显著正相关,6 月份的降水并不是其径向生长的限制因子^[36]。刘文火统计了我国西北部地区树木径向生长对气候的响应情况,发现该地区年表基本上都与各月降水正相关,但是与上一年 9 月和当年 5 月降水显著正相关的年表比例最高,分别为 73.5% 和 50.5%,与 6 月降水显著相关的比例较低

(20%)^[41]。所以树轮对 6 月降水响应不稳定的现象,可能在更大范围、不同树种间也同样存在,这有赖于我们在更大范围内对不同的树种进行持续监测。

5 结论与展望

本文在分析青杆日径向生长量与气候要素的基础上,又将时间尺度延长到 7d、10d,目的在于减弱日径向变化中水分的干扰,不同时间尺度上的分析都反映了水分对青杆径向生长的限制,随着时间尺度的延长,相关系数有所降低,说明延长时间尺度可以在一定程度上避免水分日间波动信号叠加到细胞生长膨胀分裂所揭露的水分变化信号上,从而保证响应分析的准确性。逐步回归分析的结果也显示水分在青杆径向生长中的积极贡献最大,同时为了分析生长季内各月气候要素与青杆径向生长关系,我们又以 31d 为窗口在一天时间尺度上进行了滑动相关分析,结果显示:3 年生长季 5 到 7 月的降水都与青杆的径向生长起显著正相关,关系稳定,但是 6 月降水对青杆径向生长的影响存在较大的年际波动,在降水量大的年份相关性不明显,在降水量少的年份相关性显著,这可能会导致一些树轮-气候响应研究中轮宽与 6 月降水的关系在多年统计上不显著。

此外,微树芯法可以更加直接的监测到树木的径向生长,能够精确确定树木的生长季,在很大程度上避免了外界水分的干扰,接下来需要与微树芯结合,进一步研究树木径向生长与水分的关系。

致谢:感谢甘肃省连城国家级自然保护区管理局华发春局长、满自红科长在野外监测过程中给予的无私帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Fritts H C. Tree Rings and Climate. New York: Academic Press, 1976.
- [2] Sun J Y, Liu Y. Tree ring based precipitation reconstruction in the south slope of the middle Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau, over the last millennium. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(D8): D08108.
- [3] Liang E Y, Liu X H, Yuan Y J, Qin N S, Fang X Q, Huang L, Zhu H F, Wang L L, Shao X M. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China. *Climatic Change*, 2006, 79(3/4): 403-432.
- [4] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 杨梅学, 霍玉侠, 陈秋艳. 西北干旱区树轮气候学研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 25-35.
- [5] 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊, 王丽丽. 柴达木盆地东北部过去 1437 a 的降水变化重建. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 122-126.
- [6] 方克艳, 勾晓华, 陈发虎, 彭剑峰, 刘普幸, 王茂, 朱有明. 树轮生态学研究进展. *冰川冻土*, 2008, 30(5): 825-834.
- [7] Liang E Y, Shao X M, Liu X H. Annual precipitation variation inferred from tree rings since A.D. 1770 for the Western Qilian Mts., Northern Tibetan Plateau. *Tree-Ring Research*, 2009, 65(2): 95-103.
- [8] Gou X H, Gao L L, Deng Y, Chen F H, Yang M X, Still C. An 850-year tree-ring-based reconstruction of drought history in the western Qilian Mountains of northwestern China. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(11): 3308-3319.
- [9] Archambault S, Bergeron Y. An 802-year tree-ring chronology from the Quebec boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(5): 674-682.
- [10] Hofgaard A, Tardif J, Bergeron Y. Dendroclimatic response of *Picea mariana* and *Pinus banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(9): 1333-1346.
- [11] Duchesne L, Houle D, D'Orangeville L. Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162-163: 108-114.
- [12] Deslauriers A, Rossi S, Anfodillo T. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia*, 2007, 25(2): 113-124.
- [13] Zhang J Z, Gou X H, Zhang Y X, Lu M, Xu X Y, Zhang F, Liu W H, Gao L L. Forward modeling analyses of Qilian Juniper (*Sabina przewalskii*) growth in response to climate factors in different regions of the Qilian Mountains, northwestern China. *Trees*, 2015, 30(1): 175-188.
- [14] Gou X H, Zhou F F, Zhang Y X, Chen Q Y, Zhang J Z. Forward modeling analysis of regional scale tree-ring patterns around the northeastern Tibetan Plateau, Northwest China. *Biogeosciences Discussions*, 2013, 10(6): 9969-9988.
- [15] 路明, 勾晓华, 张军周, 张芬, 满自红. 祁连山东部祁连圆柏(*Sabina przewalskii*) 径向生长动态及其对环境因子的响应. *第四纪研究*, 2015, 35(5): 1201-1208.
- [16] Wang Z Y, Yang B, Deslauriers A, Bräuning A. Intra-annual stem radial increment response of Qilian juniper to temperature and precipitation along an altitudinal gradient in northwestern China. *Trees*, 2015, 29(1): 25-34.
- [17] Wang Z Y, Yang B, Deslauriers A, Qin C, He M H, Shi F, Liu J J. Two phases of seasonal stem radius variations of *Sabina przewalskii* Kom. in

- northwestern China inferred from sub-diurnal shrinkage and expansion patterns. *Trees*, 2012, 26(6): 1747-1757.
- [18] Irvine J, Grace J. Continuous measurements of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*, 1997, 202(4): 455-461.
- [19] Mäkinen H, Nöjd P, Saranpää P. Seasonal changes in stem radius and production of new tracheids in Norway spruce. *Tree Physiology*, 2003, 23(14): 959-968.
- [20] Köcher P, Horna V, Leuschner C. Environmental control of daily stem growth patterns in five temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 2012, 32(8): 1021-1032.
- [21] Li X X, Liang E Y, Gričar J, Prislan P, Rossi S, Čufar K. Age dependence of xylogenesis and its climatic sensitivity in Smith fir on the south-eastern Tibetan Plateau. *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 48-56.
- [22] Li X X, Liang E Y, Gričar J, Rossi S, Čufar K, Ellison A M. Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2017, 62(11): 804-812.
- [23] Mäkinen H, Seo J W, Nöjd P, Schmitt U, Jalkanen R. Seasonal dynamics of wood formation: a comparison between pinning, microcoring and dendrometer measurements. *European Journal of Forest Research*, 2008, 127(3): 235-245.
- [24] 张军周, 勾晓华, 赵志千, 刘文火, 张芬, 曹宗英, 周非飞. 树轮生态学研究中的微树芯石蜡切片制作的方法探讨. *植物生态学报*, 2013, 37(10): 972-977.
- [25] Downes G, Beadle C, Worledge D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. *Trees*, 1999, 14(2): 102-111.
- [26] Tardif J, Flannigan M, Bergeron Y. An analysis of the daily radial activity of 7 boreal tree species, Northwestern Quebec. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 67(1/2): 141-160.
- [27] Bouriaud O, Leban J M, Bert D, Deleuze C. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology*, 2005, 25(6): 651-660.
- [28] Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, Carrer M. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada). *Trees*, 2003, 17(6): 477-484.
- [29] Camarero J J, Guerrero-Campo J, Gutiérrez E. Tree-ring growth and structure of *Pinus uncinata* and *Pinus sylvestris* in the central Spanish Pyrenees. *Arctic and Alpine Research*, 1998, 30(1): 1-10.
- [30] Turcotte A, Morin H, Krause C, Deslauriers A, Thibeault-Martel M. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1403-1409.
- [31] Steppe K, De Pauw D J W, Lemeur R, Vanrolleghem P A. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth. *Tree Physiology*, 2006, 26(3): 257-273.
- [32] Kozlowski T T, Pallardy S G. Growth control in woody plants. New York: Academic Press, 1997.
- [33] Tian Q Y, He Z B, Xiao S C, Peng X M, Ding A J, Lin P F. Response of stem radial growth of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to environmental factors in the Qilian Mountains of China. *Dendrochronologia*, 2017, 44: 76-83.
- [34] Urrutia-Jalabert R, Rossi S, Deslauriers A, Malhi Y, Lara A. Environmental correlates of stem radius change in the endangered *Fitzroya cupressoides* forests of southern Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 209-221.
- [35] Wimmer R, Downes G M, Evans R. High-resolution analysis of radial growth and wood density in *Eucalyptus nitens*, grown under different irrigation regimes. *Annals of Forest Science*, 2002, 59(5/6): 519-524.
- [36] He M H, Yang B, Wang Z Y, Bräuning A, Pourtahmasi K, Oladi R. Climatic forcing of xylem formation in Qilian juniper on the northeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 2015, 30(3): 923-933.
- [37] Biondi F, Hartsough P. Using automated point dendrometers to analyze tropical treeline stem growth at Nevado de Colima, Mexico. *Sensors*, 2010, 10(6): 5827-5844.
- [38] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Yang M X, Li J B, He M S, Zhang Y, Tian Q H, Peng J F. Drought variations in the eastern part of northwest China over the past two centuries: evidence from tree rings. *Climate Research*, 2009, 38(2): 129-135.
- [39] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Li Y J, Zhang F, Kazmer M. Tree growth and its association with climate between individual tree-ring series at three mountain ranges in north central China. *Dendrochronologia*, 2012, 30(2): 113-119.
- [40] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, Zhang T W, Zou C, Ji C R, Fan Z A, Qin L, Shang H M, Li X J. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 36-42.
- [41] 刘文火. 中国西北地区中、东部近 400 年来降水的时空变化及其驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.