

DOI: 10.5846/stxb201805181095

贾飞飞, 孙翠洋, 孙红月, 李鑫. 昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Jia F F, Sun C Y, Sun H Y, Li X. Responses of radial growth of two dominant tree species to climate change on Changling Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

昌岭山两个优势树种径向生长对气候变化的响应

贾飞飞*, 孙翠洋, 孙红月, 李 鑫

辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

摘要:在气候变暖背景下, 树木径向生长对气候变化的响应存在不稳定性。本文利用采自祁连山东部余脉昌岭山两个优势树种油松和青海云杉的树轮样芯, 建立树轮宽度标准年表, 通过分析树轮宽度年表与气候要素的相关关系, 探讨两个树种径向生长对气候变化的响应。结果表明: (1) 油松年表比青海云杉年表包含更多的气候信息, 其平均敏感度、标准差、信噪比和样本对总体的代表性等统计量均高于青海云杉标准年表。 (2) 气候要素对不同树种径向生长限制程度不同, 油松径向生长主要与降水 (前一年 9 月和当年 3—8 月) 和气温 (前一年 9 月) 有关, 但对降水的响应更为敏感, 而青海云杉径向生长则受到气温 (当年 9 月) 和降水 (前一年 9 月、当年 3 月和 7 月) 的共同作用。 (3) 气温突变后, 油松和青海云杉年表与各气温要素的相关性显著增强, 而青海云杉年表与气温要素的相关性变化更明显, 指示了青海云杉径向生长对气温的响应更不稳定。 (4) 生长季平均最低气温的升高诱导的干旱胁迫是油松和青海云杉树木径向生长-气温响应变化的主要原因。

关键词:昌岭山; 油松; 青海云杉; 气候变化

Responses of radial growth of two dominant tree species to climate change on Changling Mountain

JIA Feifei*, SUN Cuiyang, SUN Hongyue, LI Xin

School of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: In the context of global warming, there may be different responses of radial growth of tree species to climate change. In this paper, tree-ring cores were collected from two dominant trees, *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia*, on Changling Mountain located in the eastern region of the Qilian Mountains. In total, 147 cores were extracted from 70 *Pinus tabulaeformis* trees, and 111 cores were extracted from 54 *Picea crassifolia* trees. All cores were collected from healthy, living trees. Two tree-ring width chronologies were developed, and we analyzed the correlation relationship between the two tree-ring width chronologies and climate variables (temperature and precipitation) to determine the different responses of radial growth of two tree species to climate warming. Additionally, the Mann-Kendall method was used to analyze the abrupt change point of the mean temperature and the abrupt change of radial growth of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* to climate and this was discussed. Our results indicated that: (1) The chronology of *Pinus tabulaeformis* contained more climate information than the chronology of *Picea crassifolia*, and its mean sensitivity, standard deviation, signal to noise ratio, and expressed population signal were higher than those of the *Picea crassifolia* chronology; (2) The climatic factors had different degrees of limitation to the radial growth of the two tree species. The radial growth of *Pinus tabulaeformis* was primarily related to precipitation (September of the previous year and March to August of the current year) and temperature (September of the previous year), but it was more sensitive in its response to precipitation. However, the radial growth of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41601190)

收稿日期: 2018-05-18; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiafeifei15@163.com

Picea crassifolia was accompanied by the combined effect of temperature (September of the current year) and precipitation (September of the previous year, March and July of the current year); (3) After the abrupt temperature, the correlation between the chronologies of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* and the temperature elements significantly increased, but the correlation between the chronology of *Picea crassifolia* and temperature was more obvious, which indicated that the radial growth of *Picea crassifolia* had greater instability in its response to temperature; (4) The drought stress induced by rising the mean minimum temperature in the growing season was the main reason for the change in the radial growth-temperature response of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia*.

Key Words: Changling Mountain; *Pinus tabulaeformis*; *Picea crassifolia*; climate change

自工业化革命以来,地球平均气温异常上升,全球变暖已成为不争的事实^[1-3]。已有研究表明,全球变暖导致了全球极端气候事件增加,也对陆地生态系统产生了冲击^[4-7]。森林生态系统作为重要的陆地生态系统,在全球变暖背景下,其结构和功能都受到深刻影响,而这种影响是复杂的,在不同区域、不同森林类型所得到的结果并不一致,有的甚至相反^[8]。因此,要弄清气候变暖对森林生态系统的影响,仍需大量的研究工作,尤其是对树木生长与气候变化关系的研究,可以为我们预测森林生态系统在气候持续变暖条件下的变化情况提供依据。

树木年轮分辨率高、时间连续、获取方便,因此,树轮-气候响应模式研究已经成为了解树木生长与气候变化关系的重要手段^[9-14]。随着研究的深入,不少学者发现温度升高后,树木径向生长对气候的响应发生了变化^[15-20]。20 世纪 90 年代,D'Arrigo 等^[15]在北半球高纬度地区发现原先径向生长受温度限制的树木,在气候变暖后径向生长并没有呈现增加趋势,却生长趋势减缓,对温度的敏感性降低;Jacoby 等^[20]在阿拉斯加地区发现原本径向生长受温度限制的树木在近几十年内对温度的敏感性下降;Andreu 等^[21]在伊比利亚半岛的东部和北部的研究发现温度升高使树木对温度的敏感性下降,导致树木径向生长减弱。在我国的天山^[16]、祁连山^[17,22-23]、贺兰山^[17]、大小兴安岭^[24-25]、长白山^[18,26]和川西山地^[27]等地区也有类似发现。Jiao 等^[16]在我国天山地区研究西伯利亚落叶松发现气温升高降低径向生长对温度的敏感性;Zhang 等^[23]在祁连山地区发现近几十年气温升高引起的干旱胁迫使得青海云杉树木个体和种群的负相关性增强,树木径向生长受到限制。由此可见,气候变暖背景下,气温对树木径向生长的限制性作用发生了变化。

昌岭山位于祁连山东部,该山是祁连山东延北伸的独立山体,位于中国沙漠/黄土过渡带,北靠腾格里沙漠,距沙漠仅 8km,是中国距离沙漠最近的天然森林区^[28]。同时,该地区又是东亚季风的西北边缘,树木生长对气候变化的响应比较敏感,树轮资料记录了较多过去气候变化信息^[29-33]。近十几年来本区青海云杉出现部分死亡的现象,而油松则生长健康。为了弄清这种现象是否与气候变暖有关,本文对昌岭山地区青海云杉和油松两个优势树种进行树轮生态学研究,利用两个树种树轮资料建立标准宽度年表,分析树轮宽度年表与气候要素的相关关系,探讨气温变化后不同树种径向生长对各气温要素响应的变化。这些研究对预测气候变暖背景下本区森林生态系统可能发生的变化具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

昌岭山位于甘肃省武威市古浪县昌岭山自然保护区内(图 1),海拔 2250—2900m,气候属温带大陆性干旱气候,干燥少雨,温差大,年平均气温 8.8℃,7 月份最高气温 28.9℃,1 月份最低气温 -12.2℃,年平均降水量 185mm,主要集中在 6—9 月^[28](图 3)。山地垂直带谱明显,自下而上依次为半干旱荒漠草原带,落叶阔叶林带,常绿针叶林带以及高山灌丛带。林下土壤为灰褐森林土^[32]。植被覆盖较好,但森林植被类型较少,主要建群树种为油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)和祁连圆柏(*Sabina pizewalskii* Kom.)等,树种组成较为单纯^[32],本文利用油松和青海云杉两个优势树种树轮宽度进行气候响应研究。

1.2 树轮数据

树轮样品于 2017 年 4 月份采集,沿山脊线深入山谷进行树轮取样,海拔位于 2313—2591m 之间,共采取油松 70 棵,147 芯,青海云杉 54 棵,111 芯。按照树木年轮样本处理的基本程序对样本进行晾干、固定、打磨、定年后^[34],在北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室利用精度为 0.01mm 的 LINTAB 树轮宽度测量仪测定树轮宽度,剔除在采样过程中由于断裂导致缺轮的两个样芯,然后运用 COFFCHA 程序对交叉定年结果进行质量控制和检验^[35],确保结果准确无误,最终共选取油松样本 145 芯(69 棵),青海云杉样本 109 芯(53 棵)进行分析。

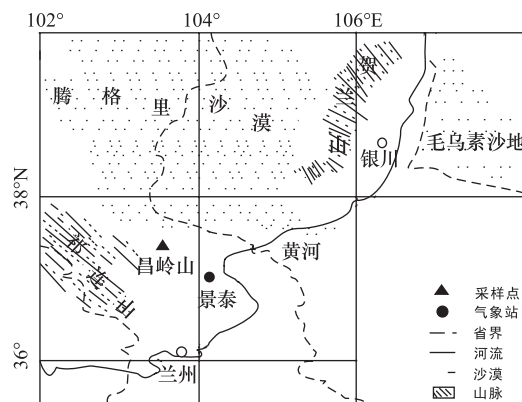


图 1 树轮采样点位置图

Fig.1 Location of tree-ring sampling site

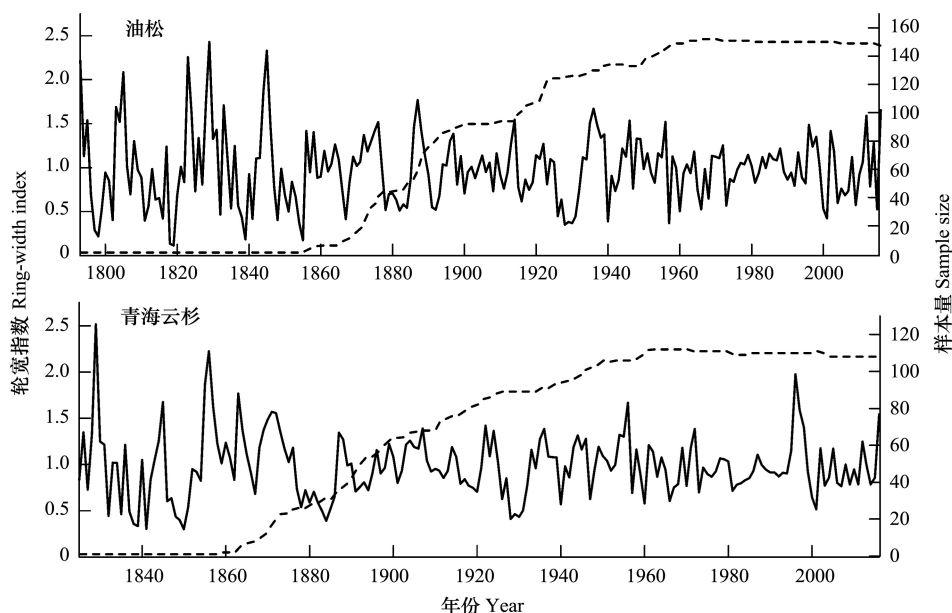


图 2 油松和青海云杉 STD 年表(实线)及样本量统计(虚线)

Fig.2 Standard chronologies of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* (solid line) and sample size (dotted line)

1.3 年表建立

油松和青海云杉年表的建立采用 ARSTAN 程序完成^[36],采用步长为 70a 的样条函数拟合树木生长趋势,之后对去生长趋势序列运用加权平均法建立树轮宽度标准化年表(STD)(图 2)。采用子样本信号强度 $SSS > 0.85$ 的样本量作为年表的起始点,高于样本量的年表序列则具有可靠性,油松年表和青海云杉年表的可靠区间分别为 1859—2016 年和 1864—2016 年。

表 1 为油松和青海云杉年表统计特征及公共区间分析结果。树木年轮学认为样本间的相关(r_1 、 r_2 、 r_3)、平均敏感度(M.S.)、信噪比(SNR)、第一主成分所占总方差量的百分比(PC1)和样本总体代表性(EPS)越大,表明所选样本对群体的代表性越好即序列的共性越强,整个分析中所包含的环境信息越多,受环境因子影响越强^[37-38]。油松年表的样本间的相关(r_1 、 r_2 、 r_3)、平均敏感度(M.S.)、和信噪比(SNR)都高于青海云杉年表,这说明油松年表含有更多的气候信息,其相应的非气候噪音较少。另外,两个年表的样本总体代表性(EPS)和第一主成分所占总方差量的百分比(PC1)均达到了较高水平,说明样本中包含的气候信息较多,序列的共

性较强,年表质量较高,可信性强,且两个年表相关系数为 $r=0.70$,说明这两个树种在生长过程中受到某些相同气候要素影响。

表 1 昌岭山油松和青海云杉年表统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the standard chronologies of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* in Changling Mountain

树种 Tree species	起止年份 Dates	年表统计量 Chronological statistics			公共区间统计量 Common interval statistics					
		M.S.	S.D.	ACI	R1	R2	R3	SNR	EPS	PC1
Pt	1793—2016	0.38	0.40	0.34	0.49	0.77	0.48	81.33	0.99	50.10%
Pc	1825—2016	0.27	0.34	0.46	0.46	0.70	0.46	49.53	0.98	47.70%

M.S.为平均敏感度;S.D.为标准差;ACI为一阶自相关系数;R1为所有序列平均相关系数;R2为树内相关系数;R3为树间相关系数;SNR为信噪比;EPS为样本总体代表性;PC1为第一主成分所占总方差的百分比(%)

1.4 气象数据

本文采用距离采样点较近的景泰气象站气候资料进行树轮-气候响应分析。气候资料包括逐月的降水(Pre)和气温(月平均气温 Tem,月平均最高气温 Tmax,月平均最低气温 Tmin)(图 3),数据时间区间为 1957—2016 年,考虑到研究区内树木的生长季节为 5—8 月^[28],故采用前一年 9 月到当年 12 月的降水和气温数据进行分析。

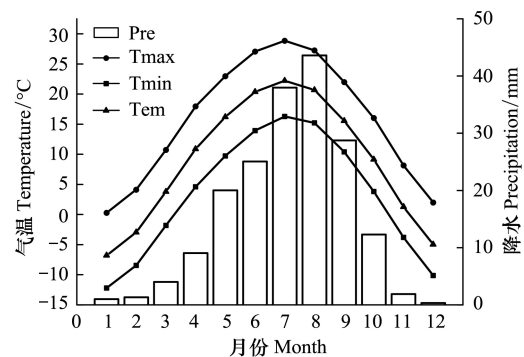


图 3 景泰气象站 1957—2016 年多月平均气温和降水分布

Fig. 3 The mean monthly temperature and precipitation of Jingtai meteorological station from 1957 to 2016

2 结果与分析

2.1 树轮宽度对气候的响应

为认识昌岭山地区树木径向生长与气候的关系,本文将油松和青海云杉两个年表与景泰气象站记录的月降水量、月平均气温、月平均最高气温和月平均最低气温等气候要素进行了相关性分析。

图 4 为油松和青海云杉年表与各气象要素的相关分析结果。油松年表与生长季后期(前一年 9 月)、生长季前期(2—4 月)和生长季(5—8 月)降水呈正相关,其中,与当年 3 月相关系数是 0.256,超过了 0.05 的显著性水平,尤其是在前一年 9 月和当年 5 月,相关系数分别为 0.342 和 0.402,均达到 0.01 的显著性水平。油松年表对各月平均气温、平均最高气温和平均最低气温三个要素的响应非常一致,其中与月平均气温和月平均最高气温在前一年 9 月呈显著负相关,相关系数分别为-0.273 和-0.283,且都达到了 0.05 的显著性水平。

青海云杉年表与前一年 9 月、当年 3 月和 7 月的降水为显著性正相关,相关系数分别是 0.340、0.298 和 0.264,其中,与前一年 9 月降水的相关性达到了 0.01 的显著性水平。青海云杉年表与当年 9 月和 12 月平均最高气温呈显著正相关,相关系数为 0.351 和 0.271,分别达到了 0.01 和 0.05 的显著性水平。

对比两个树种径向生长与气候的相关分析结果可以看出,油松和青海云杉对气候的响应模式和程度均存在一定差异。油松径向生长主要与降水(前一年 9 月和当年 3—8 月)和气温(前一年 9 月)有关,但对降水的响应更为敏感,而青海云杉径向生长则受到气温(当年 9 月)和降水(前一年 9 月、当年 3 月和 7 月)的共同作用。

2.2 树轮宽度对气温响应的稳定性分析

通过对降水多年变化趋势分析发现,1957—2016 年降水变化波动不大,上升趋势不明显。因此,本文只分析了树轮宽度对气温响应的稳定性。图 5a 显示,1957—2016 年昌岭山地区月平均最高气温、月平均气温和月平均最低气温均呈上升趋势,且月平均最低气温增幅最大。利用 Mann-Kendall 方法对月平均气温进行突变分析(图 5b)发现,月平均气温在 1996 年发生突变,突变后有明显增温趋势,2000 年以后这种增温趋势更

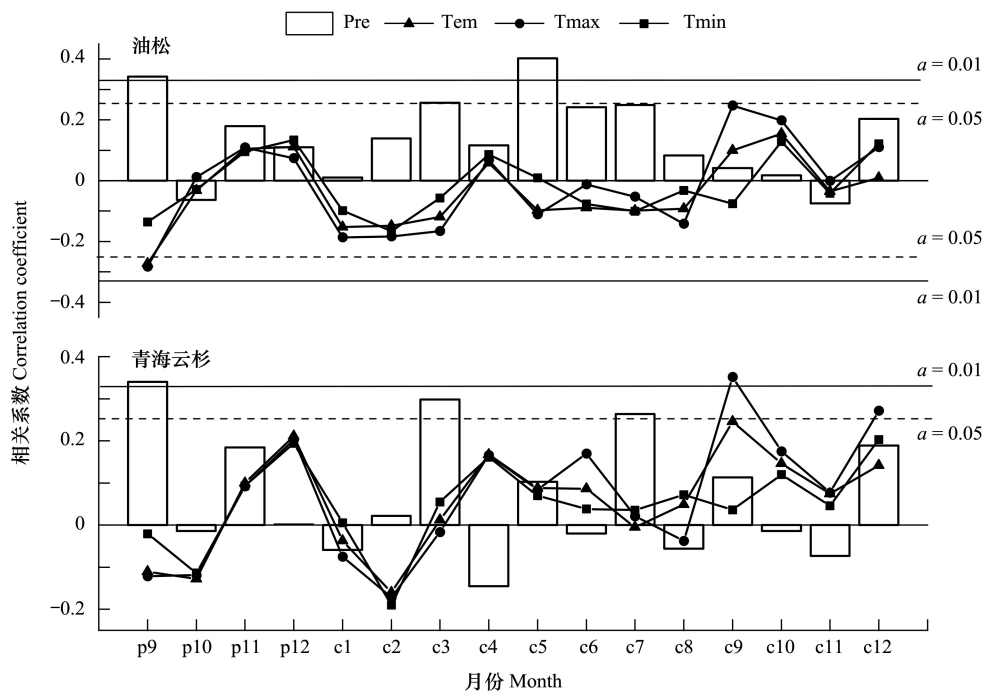


图4 树轮宽度年表与景泰气象站气象要素相关分析结果(P9—C12指前一年9月—当年12月)

Fig.4 Correlation analysis result of standardizing-width chronologies at Jingtai meteorological station (P9—C12 indicates the September of previous year to the December of current year)

为显著。因此,在后文中我们将气温要素划分为 1957—1995 年和 1996—2016 年两个时间段来进一步分析其与树木径向生长的关系。

图 6 为气温突变前后油松和青海云杉树轮宽度年表与气温要素的相关分析结果。结果显示,突变后油松和青海云杉年表与三个气温要素的相关系数和显著性均发生了不同程度的变化,其中,青海云杉年表与月平均最低温度的相关性变化最为明显。突变前,油松年表与当年 5 月平均最高气温、平均最低气温和平均气温相关系数分别为 0.129、0.262 和 0.138,而突变后相关系数变为-0.43、-0.491 和-0.473,并且与月平均最低气温和月平均气温的相关性都超过了 0.05 的显著性水平。突变后,油松年表与前一年 9 月各气温要素的相关性也发生了明显变化,与月平均最高气温、月平均最低气温和月平均气温的相关系数由突变前的-0.262、0.187 和-0.153 变为-0.337、-0.518 和-0.443,并且与月平均最低气温的相关性达到了 0.05 的显著性水平。

突变前,青海云杉年表与前一年 9 月的平均最高气温、平均最低气温和平均气温相关系数分别为-0.175、0.232 和-0.065,而突变后相关系数变为-0.066、-0.461 和-0.227,且与月平均最低气温的相关性达到了 0.05 的显著性水平。另外,突变后,青海云杉年表与当年 5—7 月各气温要素的负相关性显著增强,由正相关变为负相关。

综上所述,气温突变后油松和青海云杉年表与各气温要素的相关性都显著增强,突变后油松年表与各气温要素的相关性仍以负相关为主,而青海云杉年表与各气温要素的相关性在一些月份出现了由正相关到负相关的转变,这些变化说明随着气候变暖,两个树种对气温的响应均发生了变化,但与油松相比,青海云杉径向生长对气温的响应更不稳定。

3 讨论

油松和青海云杉均与前一年 9 月降水呈显著正相关,且相关性达到了 0.01 的显著性水平,这是由于前一年 9 月降水量充沛,土壤水分含量较高,但受到气温影响,树木径向生长已经基本停止,然而此时丰富的降水有利于营养物质的积累和土壤水分的涵养,为树木来年春季形成层活动提供良好的生长条件^[28,32-33]。在生长

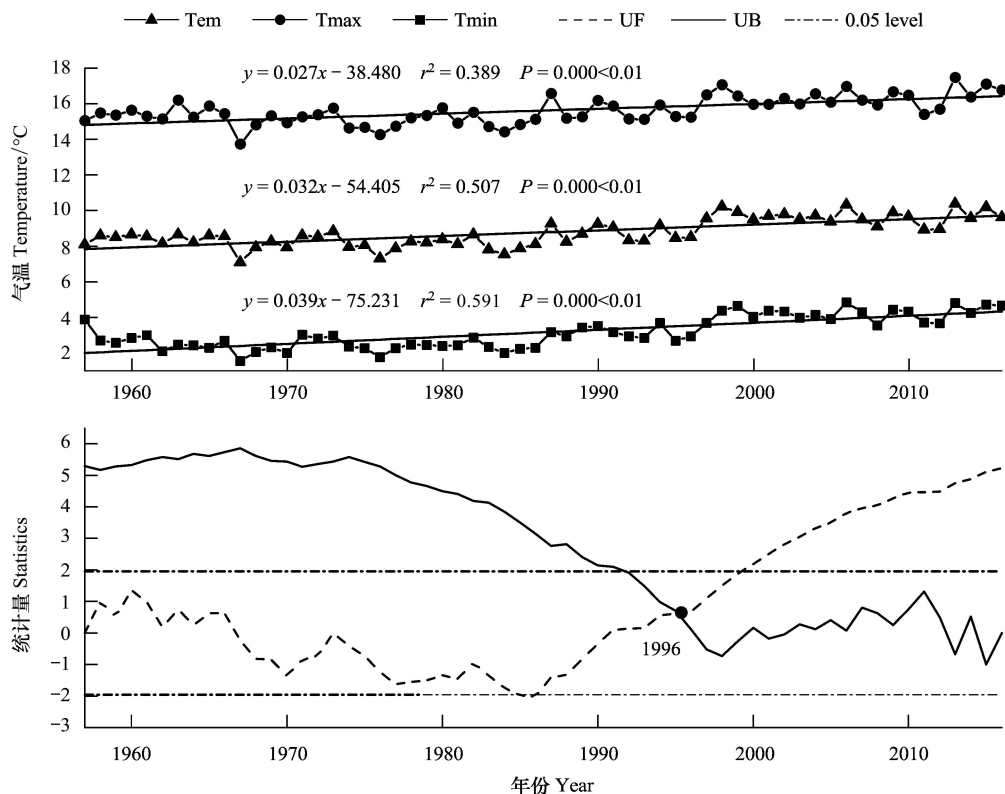


图5 气候要素变化趋势图(a)和年平均气温 Mann-Kendall 突变性检验结果(b)

Fig.5 The tendency chart of climate factors change (a), and the abrupt change was detected by the Mann-Kendall test of annual temperature (b)

季前期,两个年表的树轮宽度指数与气温要素均呈负相关,这是由于昌岭山位于沙漠边缘地区,春季降水少,气温回升快,土壤水分蒸发增多,加剧了水分的限制。在生长季,降水较多,土壤中可以供给树木生长充足的有效水分,有利于树木径向生长,使得油松和青海云杉与这个时期的降水均呈正相关,但油松与降水的相关性要高于青海云杉。

前一年生长季末期气温偏高会使树木呼吸作用加强,新陈代谢加快,消耗树木内部储存的营养物质,同时蒸发作用导致土壤水分不足,对来年开春树木生长起到了限制作用^[39-41],使得油松和青海云杉年表与三个气温要素在前一年9月都呈负相关,且油松年表与月平均最高气温、月平均气温的相关性都超过0.05的显著性水平。当年生长季末期气温偏高,使植物生长期延长^[34,42],容易出现宽轮,因此,两个树种树轮宽度年表与当年9月平均最高气温都呈正相关。

图6显示,气温突变前后,油松和青海云杉树木径向生长对气温的响应均发生了不同程度的变化,其中,青海云杉对月平均最低气温响应的变化最为显著,这种变化在生长季尤为明显。最低气温的升高一般发生在夜间,夜间最低气温的升高使得植物呼吸作用加强,植物体储存的养分消耗加快^[2],同时也会加剧土壤水分的散失,使得原本满足植物生长需求的水分条件可能变成限制因素,容易出现干旱胁迫^[43],干旱胁迫会延缓树木生长,降低径向生长对气温的敏感性,改变树木径向生长-气温关系^[16,44],特别是在生长季和生长季前后期对植物生长影响较大^[16,24]。Jiao等^[16]在天山地区的研究认为西伯利亚落叶松树木径向生长也主要受生长季最低气温的限制;姚启超等^[24]在小兴安岭得出生长季最低气温对红皮云杉径向生长限制作用最明显。在祁连山和青藏高原等地的研究也得出了类似的结论^[45-47]。青海云杉性喜温凉^[42],而油松喜光^[48-49],两个树种生理特性的差别可能是青海云杉在气温突变后对月平均最低气温的响应的变化更显著的原因。图7为气温突变前后油松和青海云杉径向生长趋势,由图也可以看出,在1957—1995年油松和青海云杉径向生长较为平

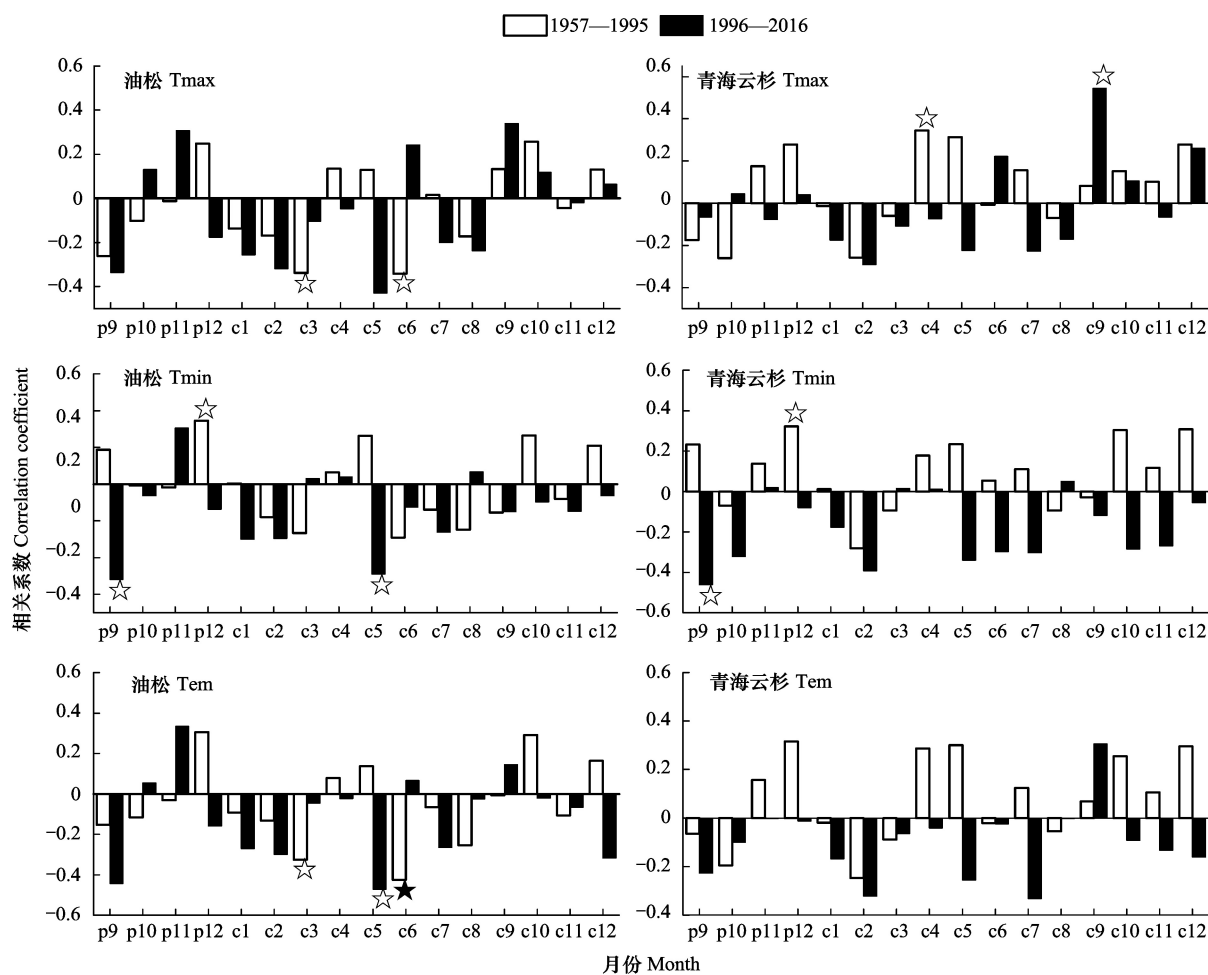


图6 油松和青海云杉两个树轮宽度年表与气候要素分段性相关分析结果(黑色实心五角星为达到0.01显著性水平,黑色空心五角星为达到0.05显著性水平。P9—C12指前一年9月—当年12月)

Fig.6 Correlation analysis result between tree-ring width chronologies of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* and climate factors from 1957—1995 and 1996—2016 (The filled stars represent significant at the 0.01 level and the open stars represent significant at the 0.05 level. P9—C12 indicates the September of previous year to the December of current year)

稳,1996年后两个树种树轮宽度指数都有下降趋势,但青海云杉树轮宽度指数下降速度要快于油松,这也说明了在气候变暖背景下,气温对两个树种的限制作用发生了变化,并且对青海云杉的限制性更强。有关研究表明,气候变暖能直接或间接引发森林死亡或衰退^[2,50-53],相对于油松,青海云杉对气候变暖的影响更为敏感,这也可能在一定程度上解释了在气温升高的气候条件下昌岭山地区青海云杉出现部分死亡的现象。

4 结论

本文利用昌岭山地区油松和青海云杉树轮资料,分析了两个树种树轮宽度年表与气候要素的关系,并探讨了气温突变前后树轮-气温响应模式的差异,得出如下

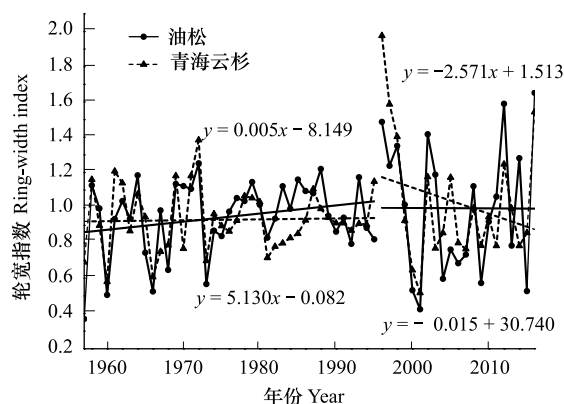


图7 1957—2016年油松和青海云杉径向生长趋势图

Fig.7 The radial growth tendency chart of *Pinus tabulaeformis* and *Picea crassifolia* from 1957—2016

结论:

(1)通过两组树轮宽度标准化年表特征发现,油松年表比青海云杉年表具有更高的平均敏感度,标准差,信噪比和样本对总体的代表性等统计量,油松年表包含更多的气候信息。

(2)相关分析结果表明,研究区油松和青海云杉对气候的响应模式和程度均存在一定差异。油松径向生长主要与降水(前一年9月和当年3—8月)和气温(前一年9月)有关,但对降水的响应更为敏感,而青海云杉径向生长则受到气温(当年9月)和降水(前一年9月、当年3月和7月)的共同作用。

(3)随着气候变暖,昌岭山地区油松和青海云杉树木径向生长-气温的关系发生了改变。气温突变后,油松和青海云杉年表与各气温要素的相关性都显著增强,但与油松相比,青海云杉径向生长对气温的响应更不稳定,受到气温的限制性更强。

(4)生长季平均最低气温的升高诱导的干旱胁迫是两个树种树木径向生长-气温响应变化的主要原因。

致谢:感谢刘剑刚老师和李亚鹏同学在野外采样工作中的帮助,也十分感谢祁连山自然保护区昌岭山地区林场王杰场长在野外采样过程给予的支持与帮助!

参考文献(References):

- [1] 秦大河,陈振林,罗勇,丁一汇,戴晓苏,任贾文,翟盘茂,张小曳,赵宗慈,张德二,高学杰,沈永平. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73.
- [2] 肖辉林. 森林衰退与全球气候变化. 生态学报, 1994, 14(4): 430-436.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 刘国华,傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.
- [5] 任国玉. 气候变暖成因研究的历史、现状和不确定性. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1084-1091.
- [6] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. Climatic Change, 1992, 21(3): 289-302.
- [7] 翟盘茂,刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63.
- [8] 严力蛟,杨伟康,林国俊,董萍. 气候变暖对森林生态系统的影响. 热带地理, 2013, 33(5): 621-627.
- [9] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 295(5563): 2250-2253.
- [10] 刘禹,王雷,史江峰,蔡秋芳. 利用贺兰山北部树轮资料重建过去 270 年以来 6—8 月平均干燥指数. 第四纪研究, 2005, 25(5): 540-544.
- [11] 刘禹,解利,李强,蔡秋芳. 公元 1820 年以来甘肃东大山地区树轮宽度对 3-9 月平均最低温度的响应分析. 地球环境学报, 2012, 3(3): 900-907.
- [12] 邵雪梅,王树芝,徐岩,朱海峰,许新国,肖永民. 柴达木盆地东北部 3500 年树轮定年年表的初步建立. 第四纪研究, 2007, 27(4): 477-485.
- [13] 勾晓华,陈发虎,杨梅学,彭剑峰,强维亚,陈拓. 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, 2004, 24(1): 172-176.
- [14] 张瑞波,袁玉江,喻树龙,陈峰,张同文,尚华明,范子昂. 树轮记录的青海过去 300 年 5-6 月平均最高气温时空变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7603-7613.
- [15] D'Arrigo R D, Jacoby G C, Free R M. Tree-ring width and maximum latewood density at the North American tree line: Parameters of climatic change. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 22(9): 1290-1296.
- [16] Jiao L, Jiang Y, Zhang W T, Wang M C, Zhang L N, Zhao S D. Divergent responses to climate factors in the radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Tianshan mountains, northwest China. Trees, 2015, 29(6): 1673-1686.
- [17] Zhang Y X, Wilmking M, Gou X H. Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China. Plant Ecology, 2009, 201(1): 39-50.
- [18] Yu D P, Wang Q L, Wang G G, Dai L M. Dendroclimatic response of *Picea jezoensis* along an altitudinal gradient in Changbai Mountains. Science in China Series E: Technological Sciences, 2006, 49(S1): 150-159.
- [19] 高琳琳,勾晓华,邓洋,张芬,方克艳. 树轮气候学中分异现象的研究进展. 冰川冻土, 2011, 33(2): 453-460.
- [20] Jacoby G C, D'Arrigo R D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(2): 227-234.
- [21] Andreu L, Gutiérrez E, Macías M, Ribas M, Bosch O, Camarero J J. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests.

- Global Change Biology, 2007, 13(4): 804-815.
- [22] Zhang Y X, Wilmking M. Divergent growth responses and increasing temperature limitation of Qinghai spruce growth along an elevation gradient at the northeast Tibet Plateau. Forest Ecology and Management, 2010, 260(6): 1076-1082.
- [23] Zhang Y X, Shao X M, Wilmking M. Dynamic relationships between *Picea crassifolia* growth and climate at upper treeline in the Qilian Mts., Northeast Tibetan Plateau, China. Dendrochronologia, 2011, 29(4): 185-199.
- [24] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1935-1944.
- [25] 张先亮, 何兴元, 陈振举, 崔明星, 黎娜. 大兴安岭山地樟子松径向生长对气候变暖的响应——以满归地区为例. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3101-3108.
- [26] Yu D P, Liu J Q, Benard J L, Zhou L, Zhou W M, Fang X M, Wei Y W, Jiang S W, Dai L M. 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, 2013, 300: 96-105.
- [27] Li Z S, Liu G H, Fu B J, Hu C J, Luo S Z, Liu X L, He F. Anomalous temperature-growth response of *Abies faxoniana* to sustained freezing stress along elevational gradients in China's Western Sichuan Province. Trees, 2012, 26(4): 1373-1388.
- [28] 鲁瑞洁, 夏虹. 腾格里沙漠南缘油松树轮宽度变化及其对气候因子的响应. 中国沙漠, 2006, 26(3): 399-402.
- [29] Chen F, Yuan Y J, Wen W S, Yu S L, Fan Z, Zhang R B, Zhang T W, Shang H M. Tree-ring-based reconstruction of precipitation in the Changling Mountains, China, since A.D.1691. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(4): 765-774.
- [30] Chen F, Yuan Y J, Chen F H, Yu S L, Shang H M, Zhang T W, Zhang R B, Qin L. Reconstruction of spring temperature on the southern edge of the Gobi Desert, Asia, reveals recent climatic warming. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 409: 145-152.
- [31] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 张瑞波, 范子昂, 张同文, 尚华明, 李杨. 腾格里沙漠南缘近 315 年 5—6 月 PDSI 指数变化. 地理科学, 2011, 31(4): 434-439.
- [32] 高尚玉, 鲁瑞洁, 强明瑞, 哈斯, 张登山, 陈原, 夏虹. 140 年来腾格里沙漠南缘树木年轮记录的降水量变化. 科学通报, 2006, 51(3): 326-331.
- [33] 王亚军, 高尚玉, 马玉贞, 鲁瑞洁, 桑艳礼, 蒙红卫. 基于树轮重建的宁夏河东沙地西部公元 1899 年来年降水量的变化. 干旱区地理, 2010, 33(3): 377-384.
- [34] Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press. 1976.
- [35] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [36] Cook E R, Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. Tree-Ring Bulletin, 1981, 41: 45-53.
- [37] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 李金豹. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录. 生态环境, 2005, 14(4): 460-465.
- [38] 秦莉, 尚华明, 苏佳佳, 袁玉江, 张同文, 喻树龙, 范子昂, 陈峰. 巴丹吉林沙漠西南缘胡杨径向生长对气候的响应. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 77-81.
- [39] 康淑媛, 杨保. 甘肃省南部两种云杉树种树木径向生长对气候因子的响应. 中国沙漠, 2013, 33(2): 619-625.
- [40] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试. 地理学报, 1996, 51(S1): 92-101.
- [41] 勾晓华, 邵雪梅, 王亚军, 陈发虎. 祁连山东部地区树木年轮年表的建立. 中国沙漠, 1999, 19(4): 364-367.
- [42] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 刘普幸, 张永, 方克艳. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*) 树轮生长特性及其对气候的响应. 生态学报, 2007, 27(8): 3268-3276.
- [43] 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.
- [44] Carrer M, Urbinati C. Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. New Phytologist, 2006, 170(4): 861-871.
- [45] Gao L L, Gou X H, Deng Y, Liu W H, Yang M X, Zhao Z Q. Climate-growth analysis of Qilian juniper across an altitudinal gradient in the central Qilian Mountains, northwest China. Trees, 2013, 27(2): 379-388.
- [46] 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.
- [47] Xu G B, Liu X H, Qin D H, Chen T, Wang W Z, Wu G J, Sun W Z, An W L, Zeng X M. Tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ evidence for the drought history of eastern Tianshan Mountains, northwest China since 1700 AD. International Journal of Climatology, 2014, 34(12): 3336-3347.
- [48] 高芳玲, 秦小龙, 杨振. 油松生物学特性及其生长规律探讨. 现代农业科技, 2008, (21): 19-19.
- [49] 张芬, 勾晓华, 苏军德, 高琳琳, 刘文火, 满自红. 祁连山东部不同树龄油松径向生长对气候的响应. 冰川冻土, 2011, 33(3): 634-639.
- [50] Auclair A N D, Martin H C, Walker S L. A case study of forest decline in western Canada and the adjacent United States. Water, Air, and soil Pollution, 1990, 53: 13-31.
- [51] 于世河. 气候变化对森林树木死亡率影响研究综述. 防护林科技, 2014, (6): 67-68, 95.
- [52] 黄薇霖, 田育红, 刘怡青, 宋含章. 森林死亡及其对气候变化响应研究进展. 林业科技通讯, 2017, (3): 3-10.
- [53] 朱教君, 李凤芹. 森林退化/衰退的研究与实践. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1601-1609.