

祁连山东部不同树种径向生长对气候因子的响应

詹思敏 王可逸 张凌楠* 冉依林 刘晓宏

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要 为研究祁连山东部不同树种树木径向生长对气候因子响应的差异,采集青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)两个树种的树木年轮样芯,建立树轮宽度年表,并分析不同类型年表与24个时间尺度气候因子的相关性。分析年表参数发现,青海云杉的差值年表质量优于标准年表,祁连圆柏则相反。青海云杉树轮宽度年表包含的气候信息丰富度多于祁连圆柏。祁连圆柏对温度的响应要强于青海云杉,主要与前一年6—7月、前一年9月以及当年5—8月均温呈显著负相关,青海云杉对降水的响应要强于祁连圆柏,主要与前一年9月、当年7—8月累积降水呈显著正相关。两树种的径向生长均受到干旱胁迫,全球变暖背景下,这种胁迫会加剧,因此需要加强对祁连山森林的保护和管理。

关键词 祁连山; 青海云杉; 祁连圆柏; 树轮宽度; 气候因子

Species-specific growth responses to climatic factors in the eastern Qilian Mountains. ZHAN Si-min, WANG Ke-yi, ZHANG Ling-nan*, RAN Yi-lin, LIU Xiao-hong (School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China).

Abstract: To understand the growth responses of different tree species to climatic factors in the eastern Qilian Mountains, we developed tree-ring width chronologies from two dominant tree species (*Picea crassifolia* and *Juniperus przewalskii*). The correlation coefficients between chronologies and climatic factors were calculated at 24 time scales. According to the parameters of chronologies, the residual chronology of *P. crassifolia* had higher quality than the standard chronology, but the case was opposite for *J. przewalskii*. The responses of *J. przewalskii* to temperature factors were stronger than that of *P. crassifolia*, which showed negative correlation with mean temperature from the previous June–July, the previous September and the current May–August. The responses of *P. crassifolia* to precipitation factors were stronger than that of *J. przewalskii*, which were positively correlated with total precipitation from the previous September and the current July–August. The radial growth of both species suffered from drought stress. In the context of global warming and intensified drought stress, enhanced protection and management should be carried out.

Key words: Qilian Mountains; *Picea crassifolia*; *Juniperus przewalskii*; tree-ring width; climatic factor.

树木的生长不仅受其所处的自然环境影响,同时还受自身特性影响。不同树种由于生境和生理生态特性的差异,采取了不同的生存策略,对气候因子表现出不同的响应特征。树木年轮较易于获得且能够精确定年,同时具备连续性强和分辨率高的优点。利用树木年轮的技术手段研究不同树种树木径向生

长对于气候的响应差异是正确理解树木径向生长的调节机制、对森林动态进行科学预测的有效手段(Fritts, 1925; Cook *et al.*, 1990)。

相关研究表明,西天山的雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)表现出与前一年夏季降水显著正相关、与前一年夏季温度显著负相关,而同研究区内与其生长策略不同的胡桃(*Juglans regia*)则与前一年夏季降水和当年夏季温度均显著正相关(Magnuszewski *et al.*, 2015)。在长白山红松(*Pinus koraiensis*)和黄花落叶松(*Larix olgensis*)分布下限,生长季较高的

国家自然科学基金青年基金项目(41801024)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(GK201803050和GK201801007)资助。

收稿日期: 2018-11-08 接受日期: 2019-04-12

* 通讯作者 E-mail: zln@snnu.edu.cn

气温能够促进红松的生长,但对黄花落叶松却无明显影响,这些现象表现出了红松喜温、黄花落叶松耐寒的特点(陈力等,2011)。在加拿大安大略湖北部的研究发现,生长季温度的升高会促进北美短叶松(*Pinus banksiana*)的径向生长,但引起黑云杉(*Picea mariana*)生长下降(Subedi *et al.*, 2013)。因此,不同树种由于其生活习性和生长策略的不同,对气候的响应也有所差异。研究不同树种对气候因子的响应,利于在森林经营管理中针对不同树种制定不同管理方法,促进森林生态系统健康发展。

祁连山兼受东亚季风和西风带的影响,属于气候敏感区。祁连山是黄河流域重要水源产流地,也是我国西部关键的生态安全屏障,其森林生态系统具有涵养水源、保护生物多样性等重要作用,目前已经成立了祁连山国家自然保护区,因此该地区具有重要的研究意义(Gao *et al.*, 2015; Gao *et al.*, 2018)。青海云杉和祁连圆柏是该地区的优势针叶树种,其对气候响应敏感,适合进行树木年轮学的相关研究,目前该研究区已经开展了很多有关这两个树种树木径向生长与气候因子关系的研究工作(Chen *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2013)。但详细对比青海云杉与祁连圆柏不同年表质量差异及两树种对气候响应差异的研究还较少。

本研究以祁连山的哈溪林场的青海云杉和祁连圆柏为研究对象,开展树木年轮生态学研究,主要包括:(1)建立两个树种树木年轮宽度年表,分析年表特征;(2)比较不同类型年表包含气候信息差异;(3)分析两树种径向生长与24个时间尺度的气候因子相关关系差别。从而对祁连山地区的树轮宽度资料进行补充和完善,对比不同树种对气候因子响应的差异,揭示影响树木径向生长的关键气候因子,为森林的保护和管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

祁连山(93°E—102°40'E, 36°40'N—40°N)位于青藏高原北缘,由平行排列的复杂山岭和谷地组成,跨甘肃、青海两省。山脉总体走向是从西北倾向东南,西北高、东南低,海拔一般在2500~4500 m,随着海拔的变化,植被呈现明显的垂直变化。祁连山的青海云杉(*Picea crassifolia*)主要分布在海拔2400~3300 m的阴坡,且多为纯林,在西部海拔2900 m以上有少数青海云杉与祁连圆柏(*Juniperus przewal-*

skii)的混交林,在东部海拔2900 m以下有少数青海云杉与山杨(*Populus davidiana*)、紫桦(*Betula utilis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、白扦(*Picea meyeri*)等树种的混交林(刘兴聪,1992)。祁连圆柏在祁连山区的分布仅次于青海云杉林,且分布生境与青海云杉林的分布差异悬殊,主要分布在祁连山林区海拔2500~3500 m的阳坡、半阳坡和半阴坡上,呈块状或片状。祁连山水热条件差异大,山地东部降水多,气温较高,而西部地区降水稀少、温度较低(邓少福,2013)。采样区位于祁连山东部,降水比其他地区更为充沛,气温也更高。

1.2 气象资料

气象数据来源于距离采样点最近的两个气象站,其具体信息见表1。计算两个气象站1953—2014年的平均月均温和月降水量,降水集中在7—8月,温度较高的月份在6—7月(图1)。根据气象站的海拔采用反距离权重法换算海拔2900 m的降水数据以代表采样点的降水情况,再根据两个气象站的海拔和温度计算本研究区的气温直减率,并求得海拔2900 m处的温度。本研究选择月均温、月总降水量、标准化降水蒸发指数(SPEI)气象因子。每个因子不仅选择从前一年6月至当年10月的单月值,还对每个因子进行1~24个月尺度的累计计算。对降水而言,是将某个月的降水及其之前1~24个月的降水求和,计算出累积的降水;对温度而言,是将某个月的温度及其之前1~24个月的温度求均值(Vicente-Serrano *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017)。计算获得的1~24个月尺度的气象数据将用于之后的分析。

1.3 样品采集及年表建立

2015年8月于祁连山哈溪林场采样,采样点信息见表2。选择人为干扰小、没有遭受病虫害且与周围树木竞争弱的健康树木进行采样。在树木胸径(约1.3 m)处使用直径为5.15 mm的生长锥沿平行

表 1 祁连山采样点及其附近气象站的信息
Table 1 Information of sampling sites and nearby meteorological stations in the Qilian Mountain

气象站名称	气象站海拔(m)	距采样点距(km)	位于采样点方位	经度	纬度
乌鞘岭	3045	21.76	南	102.87°E	37.20°N
武威	1532	81.89	东北	102.67°E	37.92°N

表 2 采样点信息

Table 2 Summary of the sampling locations

树种	纬度	经度	海拔 (m)	坡向	样树/ 样芯数
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	37.41°N	102.55°E	2900	东北	26/52
祁连圆柏 <i>Juniperus przewalskii</i>	37.40°N	102.54°E	2910	西南	26/52

坡面和垂直坡面各钻取树芯一个,将取得的样芯放入细纸筒内,进行编号、标记、密封。

对样本作晾干、固定和打磨的处理,再初步交叉定年及测量轮宽。初步定年后通过骨架示意图的方

法交叉定年,检查可能存在的遗失年轮和伪年轮,采用 LINTAB 年轮宽度测量仪测量树木年轮宽度,分辨率 0.01 mm(吴祥定,1990)。再通过 COFECHA 程序对交叉定年和测量宽度进行检验,查找定年和测量宽度过程中出现的错误,适当去除年龄过短,错误过多的样芯。利用 ARSTAN 程序,采用负指数函数拟合树木生长趋势,消除采样点的生长趋势和树木之间干扰竞争等干扰,建立 3 种类型的树轮年表:标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。本文采用两树种的标准年表和差值年表(图 2)进行对比分析。

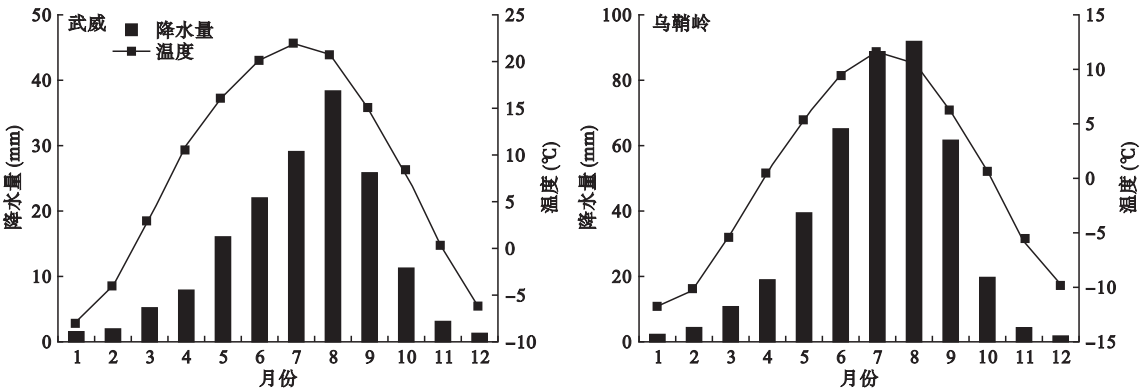


图 1 武威气象站和乌鞘岭气象站逐月平均气温和逐月降水量(1953—2014)
Fig.1 Mean monthly temperature and total monthly precipitation of Wuwei and Wushaoling meteorological stations (1953—2014)

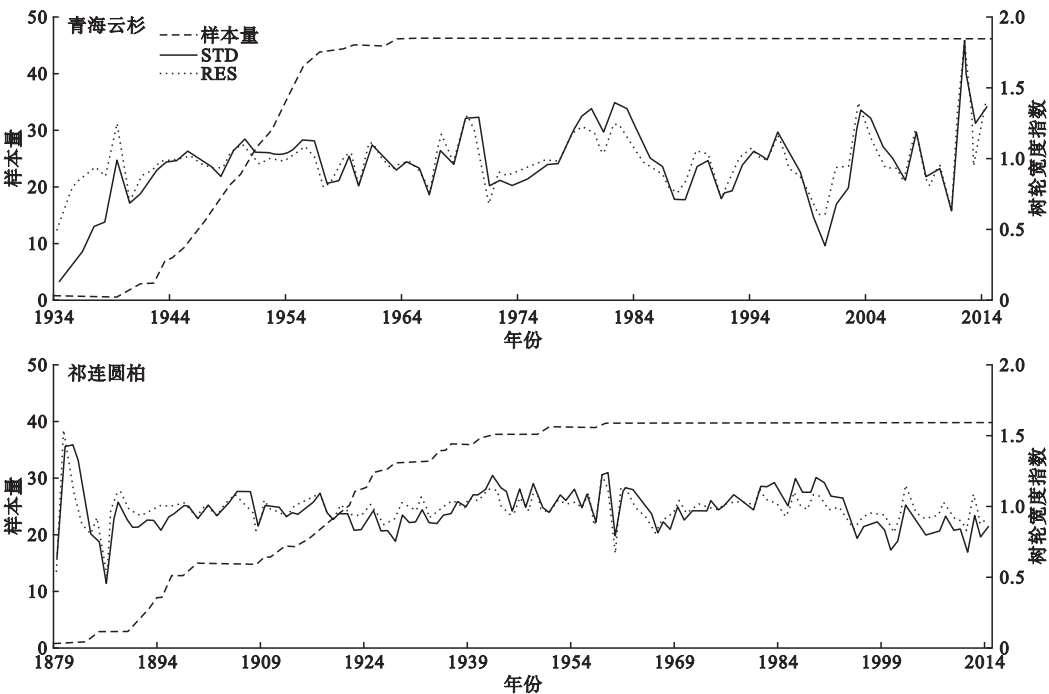


图 2 青海云杉和祁连圆柏树轮宽度标准年表(STD)和差值年表(RES)
Fig.2 Standard ring-width chronology (STD) and residual ring-width chronology (RES) of *Picea crassifolia* and *Juniperus przewalskii*

1.4 分析方法

利用 SPSS 软件分析 1955—2014 年标准年表、差值年表与校正气象数据的 24 个尺度的月均温、月降水量以及标准化降水蒸发指数 (SPEI) 的相关关系,再采用 Matlab 软件作图分析青海云杉和祁连圆柏响应结果的相同处和不同处,从而得出结论。本文主要采取 Pearson 相关分析的方法,对影响青海云杉和祁连圆柏树轮宽度生长的温度、降水等因子逐个进行分析,目的是要揭示不同树种径向生长对不同气候因子的响应差异。

2 结果与分析

2.1 不同树种不同类型年表参数对比

由表 3 可以看出,除一阶自相关系数 (AC1) 外,

青海云杉的差值年表 (RES) 的各项参数皆比标准年表 (STD) 高,说明 RES 年表包含的气候信息量更大,年表与气候资料的相关性明显,各年轮间差距大,气候对树木生长影响突出。青海云杉的两个年表的 EPS 均达到 98% 以上,说明样本有着很好的代表性。而综合各项参数的比较,除平均敏感度外 (MS),祁连圆柏的 STD 年表的各项参数数值均要高于 RES 年表。整体而言,青海云杉的年表信息丰富度要高于祁连圆柏的年表。

2.2 不同树种树木径向生长与温度的相关关系

从图 3 可以看出,青海云杉和祁连圆柏的 STD 年表与 24 个尺度温度因子的相关性要比 RES 年表强。从 STD 年表来看,青海云杉显著地呈现出与前一年 7—9 月均温、当年 7—8 月均温的负相关关

表 3 各个年表的统计特征

Table 3 Statistics characteristics of chronologies

树种	R_1	R_2	R_3	SNR	EPS	MS	SD	PC1 (%)	AC1
青海云杉 STD	0.648	0.645	0.787	80.992	0.988	0.180	0.258	66.40	0.558
青海云杉 RES	0.697	0.694	0.818	101.171	0.990	0.192	0.195	70.70	-0.013
祁连圆柏 STD	0.156	0.150	0.462	6.668	0.870	0.105	0.235	27.30	0.734
祁连圆柏 RES	0.154	0.149	0.367	6.532	0.867	0.134	0.145	21.70	-0.033

R_1 为样本之间的平均相关系数; R_2 为树与树之间的平均相关系数; R_3 为同一棵树不同样本之间的平均相关系数; PC1 代表第一主分量所占总方差量的百分比; AC1 为一阶自相关系数; SD 为标准差; MS 为平均敏感度; SNR 为信噪比; ESP 为样本量的总体解释信号; STD 为标准年表; RES 为差值年表。

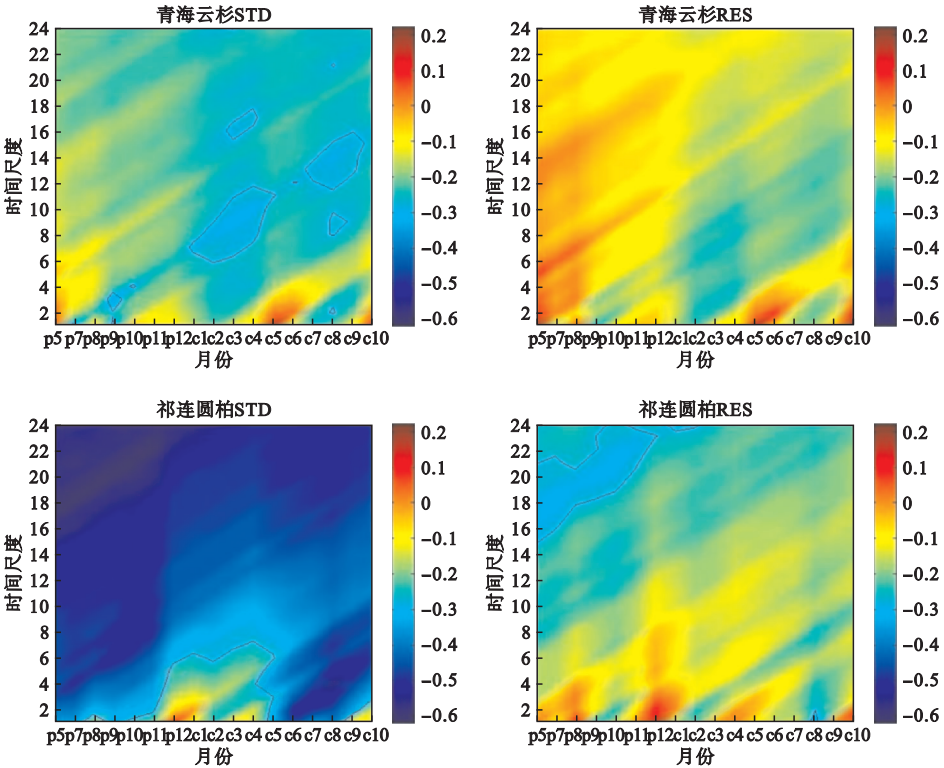


图 3 青海云杉与祁连圆柏标准年表 (STD) 和差值年表 (RES) 与前一年 6 月至当年 10 月 24 个时间尺度均温的相关系数 (1955—2014)
Fig.3 Correlation coefficients of standard chronology (STD) and residual chronology (RES) with mean monthly temperature from June of previous year to October of current year at 24 time scales (1955–2014)
图中实线表示 0.05 水平的显著性。

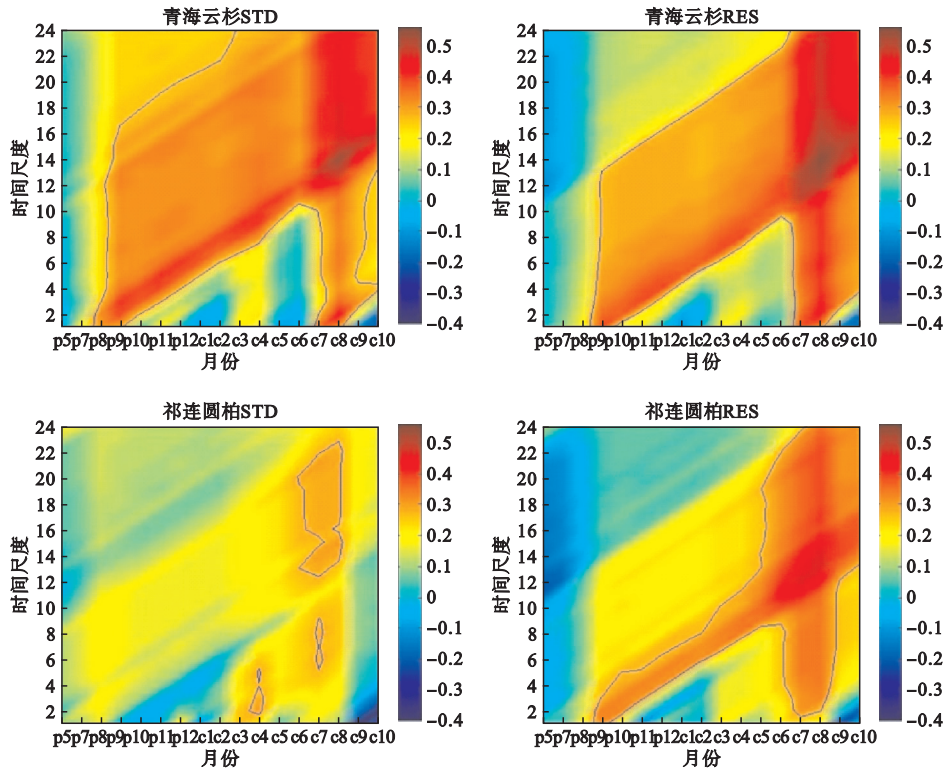


图4 青海云杉与祁连圆柏标准年表(STD)和差值年表(RES)与前一年6月至当年10月24个时间尺度总降水的相关系数(1955—2014)

Fig.4 Correlation coefficients of standard chronology (STD) and residual chronology (RES) with total precipitation from June of previous year to October of current year at 24 time scales (1955—2014)

图中实线表示0.05水平的显著性。

系,祁连圆柏与前一年6—7月、9月以及当年5—8月均温则有显著负相关。而RES年表与温度因子的显著相关月份相对于STD年表很少,祁连圆柏仅表现出与当年8月显著负相关。

2.3 不同树种径向生长与降水的相关关系

青海云杉和祁连圆柏的RES年表与降水因子的相关总体要强于STD年表(图4)。从RES年表来看,青海云杉主要与前一年9月、当年7—8月累积降水有显著正相关,祁连圆柏主要与前一年9月、当年6—8月累积降水呈显著正相关。祁连圆柏与降水显著相关的月份与青海云杉类似,但其在单月尺度上能体现显著的月份较少,且相关程度要弱于青海云杉。青海云杉的STD年表与降水因子显著相关的月份与RES年表基本一致,但相关程度要弱。祁连圆柏的STD年表与降水因子显著相关的月份则要明显少于RES年表。

2.4 不同树种径向生长与标准化降水蒸发指数(SPEI)的相关关系

从图5来看,RES年表与SPEI相关显著的程度和相关显著月份分别强于和多于STD年表。从

RES年表开看,青海云杉与前一年9月、前一年11月和当年7月的SPEI有显著正相关,祁连圆柏主要与前一年9月、前一年11月、当年3月及当年7月的SPEI有显著正相关。STD年表与SPEI显著表现较弱,尤其是祁连圆柏与SPEI的显著相关性只体现在前一年11—12月和当年2—4月。

3 讨论

3.1 不同类型年表体现的气候信息差异

在本研究中,在1955—2014的公共区间,青海云杉差值年表(RES)的 R_1 、 R_2 、 R_3 、SNR、PC1参数均高于标准年表(STD),EPS达99%,说明RES年表表现出更强的高频振荡同步性,包含丰富的气候信息。除MS外,祁连圆柏的STD年表各项参数均高于RES年表,祁连圆柏STD年表在总体水平上质量更高。徐金梅等(2012)对祁连山中下部限青海云杉的研究采用了质量更好的STD年表进行相关分析,而郭允允等(2007)对天山中段雪岭云杉的研究和张贇等(2018)对滇西北石卡雪山丽江云杉(*Picea likiangensis*)和高山松(*Pinus densata*)的研究均反映

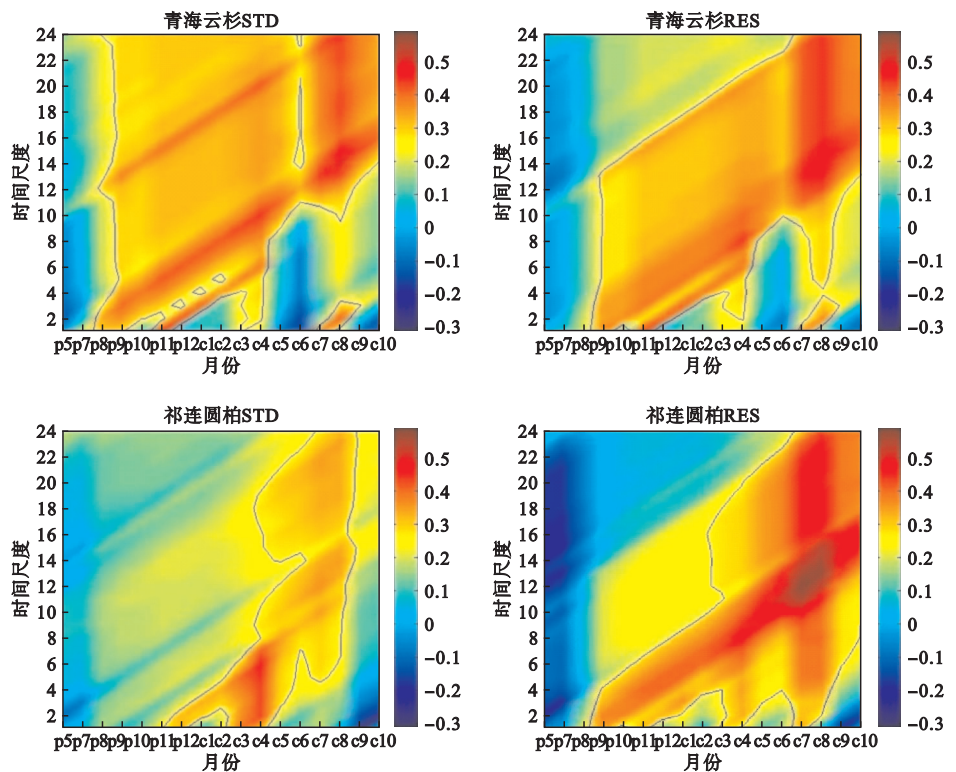


图 5 青海云杉与祁连山圆柏标准年表 (STD) 和差值年表 (RES) 与前一年 6 月至当年 10 月 24 个时间尺度的 SPEI 的相关系数 (1955—2014)

Fig.5 Correlation coefficients of standard chronology (STD) and residual chronology (RES) with SPEI from June of previous year to October of current year at 24 time scales (1955–2014)

图中实线表示 0.05 水平的显著性。

了在其研究区 RES 年表的质量要优于 STD 年表的现象。这表明在不同的研究区域针对不同树种的研究年表类型的选择会有所差异,在比较年表参数的基础上选用质量更好的年表类型更有利于相关分析。

不同类型年表与气候因子相关分析结果表明,STD 年表与温度因子的显著相关表现更突出,而 RES 年表与降水因子、标准化降水蒸发指数 (SPEI) 的显著相关性更强。这也说明不同类型年表中对于反映树木径向生长对不同气候因子响应的能力也有所差异,因此在利用树木年轮进行气候重建或研究树木生长对气候变化响应敏感性时应选择最能体现目标气候因子的年表类型。

3.2 不同树种树木径向生长对气候因子的响应差异

从树木径向生长对温度因子的响应来看,青海云杉与前一年 7—9 月和当年 7—8 月均温均表现出显著负相关性。祁连山圆柏与前一年 6—7 月、前一年 9 月以及当年 5—8 月均温有显著负相关。青海云杉和祁连山圆柏与温度因子显著相关的月份都主要在 7、8 月,这种现象可能由于 7、8 月份是全年温度最高的两个月份,高温导致树木气孔关闭,二氧化碳吸

收量减少,光合作用减弱,此外,高温导致土壤水分蒸发强烈,环境干旱,抑制了树木形成层细胞的生理活动,不利于树木的径向生长 (Tian *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018)。在祁连山中部的西水林场 (Lu *et al.*, 2015) 和大黄谷 (Gao *et al.*, 2013) 的研究都发现,青海云杉与前一年 7—9 月的均温都有显著负相关,在祁连山东部青海云杉的研究 (Deng *et al.*, 2013) 表明,树木生长与当年 7—8 月均温有显著负相关。而分布在青海南山 (Liang *et al.*, 2006)、甘肃酒泉 (Liang *et al.*, 2010) 的祁连山圆柏也有与当年 7 月的均温显著负相关的现象。但两者进一步比较则发现祁连山圆柏与温度显著相关的程度更高。祁连山圆柏主要分布在阳坡、半阳坡,环境条件较为炎热干燥,光照强烈,高温易引起叶片气孔关闭,降低树木光合作用,而青海云杉分布在阴坡、半阴坡,光照强度较弱,因此其受高温的影响要弱于祁连山圆柏。本研究发现,随着温度和干旱程度的增加,在祁连山地区较干旱的阳坡和半阳坡的祁连山圆柏比分布在阴坡的青海云杉更容易出现生长下降和更频繁的死亡事件。在气候变暖的大背景下,在森林经营管理方面,

应着重加强对祁连圆柏林分的保护和管理。

从树木径向生长对降水和 SPEI 的响应来看,青海云杉主要与前一年 9 月、当年 7—8 月累积降水具有显著正相关关系,与前一年 9 月、前一年 11 月和当年 7 月的 SPEI 有显著正相关关系。祁连圆柏主要与前一年 9 月、当年 6—8 月累积降水呈显著正相关,与前一年 9 月、前一年 11 月、当年 3 月及当年 7 月的 SPEI 呈显著正相关。从结果可以看出,本研究区树木径向生长与降水因子和 SPEI 显著相关的月份比较相似。树木径向生长与前一年 9 月的降水和湿润度显著相关,说明前一年生长季末充足的水分有助于树木积累更多的有机物质,促进下一年较宽年轮的形成,这也反映了气候对树木径向生长影响的滞后效应(Rossi *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2014)。而当年 7—8 月份的充足降水可以弥补高温引起的土壤水分的强蒸发,削弱同时期高温的抑制作用,降低树木受到干旱胁迫的风险。袁亚鹏(2015)在祁连山中部海拔 3100 m 处对青海云杉的研究也发现树轮宽度与前一年 9、10 月份的降雨量呈显著正相关,其研究认为前一年较好降水条件会使树木储存较多的养分,即使下一年的降水很少,通常也就只形成一个正常或者偏窄的年轮。宋文琦等(2018)对青藏高原东北祁连圆柏与气候关系的研究表明,祁连圆柏与夏季的降水表现出显著正相关,祁连山区中部寺大隆林场的青海云杉也表现出与 8 月降水显著相关关系。通过对比两树种可发现,青海云杉与降水因子的显著相关程度明显高于祁连圆柏,这可能与这两种树种的生理特性有关。祁连圆柏长期生活在更为干旱的阳坡和半阳坡,根系发达,能够吸取更深层的土壤水分,并提高水分利用效率和导水率,从而抵抗干旱(Wang *et al.*, 2015)。相对而言,青海云杉生境水分条件要优于祁连圆柏,其生长所利用的土壤水分要浅于祁连圆柏,因此其对降水的响应要比祁连圆柏更加敏感。类似现象在祁连山区祁丰林场的研究也有所发现(Liang *et al.*, 2009)。此外,祁连圆柏与青海云杉在与 SPEI 的显著相关月份的差异主要在于祁连圆柏与当年 3 月的 SPEI 存在显著正相关,这是由于阴坡、阳坡的水分条件差异使得祁连圆柏容易受到春旱的影响,故而在 3 月表现出了对 SPEI 的更强响应(Kang *et al.*, 2013)。曾令兵等(2012)在研究祁连山中段青海云杉高山林线交错区树轮宽度对气候变化的响应时也发现了此现象。

4 结 论

通过分析青海云杉和祁连圆两个树种的不同类型树轮宽度年表,发现青海云杉的差值年表质量更好,对祁连圆柏而言则标准年表包含着更多的气候信息。青海云杉年表比祁连圆柏年表质量更好,气候信息量更大。年表与气候因子的相关结果表明,两个树种树木径向生长对气候因子的响应存在差异,祁连圆柏对温度的响应要比青海云杉更敏感,主要与前一年 6—7 月、前一年 9 月以及当年 5—8 月均温有显著负相关,青海云杉对降水和干旱指数的响应要强于祁连圆柏,主要与前一年 9 月、当年 7—8 月累积降水和标准化降水蒸发指数有显著正相关。两树种对气候因子响应的差异,为林区对不同类型森林进行区别管理提供了科学依据,能够提高森林经营管理的效率和针对性。两树种均受到高温和少雨的限制作用,在全球变暖的背景下,干旱胁迫对这两种树木生长的影响会加剧,为生态保护带来威胁,应加强对祁连山森林的保护和管理力度。

参考文献

- 陈 力, 吴绍洪, 戴尔阜. 2011. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征. 地理研究, **30**(6): 1147–1155.
- 邓少福. 2013. 祁连山气候变化对植被的影响研究(2000—2011)(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 郭允允, 刘鸿雁, 任 佶, 等. 2007. 天山中段树木生长对气候垂直梯度的响应. 第四纪研究, **27**(3): 322–331.
- 刘兴聪. 1992. 祁连山哈溪林场青海云杉林生物量的测定. 甘肃林业科技, (1): 7–10.
- 宋文琦, 朱良军, 张 旭, 等. 2018. 青藏高原东北部不同降水梯度下高山林线祁连圆柏径向生长与气候关系的比较. 植物生态学报, **42**(1): 571–577.
- 吴祥定. 1990. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社.
- 徐金梅, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 2012. 祁连山青海云杉径向生长对气候的响应. 北京林业大学学报, **34**(2): 1–6.
- 袁亚鹏. 2015. 祁连山中部不同海拔青海云杉径向生长对气候的响应(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 曾令兵, 王襄平, 常锦峰, 等. 2012. 祁连山中段青海云杉高山林线交错区树轮宽度与气候变化的关系. 北京林业大学学报, **34**(5): 50–56.
- 张 贇, 尹定财, 孙 梅, 等. 2018. 滇西北石卡雪山 2 个针叶树种森林上限径向生长对温度和降水的响应. 生态学报, **38**(7): 2442–2449.
- Chen F, Yuan YJ, Wei WS, *et al.* 2012. Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China. *Theoretical and Applied Climatology*, **107**: 633–643.
- Cook ER, Kairiukstis LA. 1990. Methods of dendrochronology:

- Applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Deng Y, Gou XH, Gao LL, *et al.* 2013. Aridity changes in the eastern Qilian Mountains since AD 1856 reconstructed from tree-rings. *Quaternary International*, **283**: 78–84.
- Fritts HC. 1925. Tree rings and climate. New York: Academic Press.
- Gao LL, Gou XH, Deng Y, *et al.* 2015. Dendroclimatic reconstruction of temperature in the eastern Qilian Mountains, northwestern China. *Climate Research*, **62**: 241–250.
- Gao LL, Gou XH, Deng Y, *et al.* 2013. Dendroclimatic response of *Picea crassifolia* along an altitudinal gradient in the eastern Qilian Mountains, Northwest China. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, **45**: 491–499.
- Gao LL, Gou XH, Deng Y, *et al.* 2018. Increased growth of Qinghai spruce in northwestern China during the recent warming hiatus. *Agricultural and Forest Meteorology*, **260–261**: 9–16.
- Huang JG, Deslauriers A, Rossi S. 2014. Xylem formation can be modeled statistically as a function of primary growth and cambium activity. *New Phytologist*, **203**: 831–841.
- Kang SY, Yang B, Qin C, *et al.* 2013. Extreme drought events in the years 1877–1878, and 1928, in the southeast Qilian Mountains and the air-sea coupling system. *Quaternary International*, **283**: 85–92.
- Liang EY, Shao XM, Eckstein D, *et al.* 2010. Spatial variability of tree growth along a latitudinal transect in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Forest Research*, **40**: 200–211.
- Liang EY, Shao XM, Eckstein D, *et al.* 2006. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management*, **236**: 268–277.
- Liang EY, Shao XM, Liu XH. 2009. Annual precipitation variation inferred from tree rings since A.D. 1770 for the western Qilian Mts., Northern Tibetan Plateau. *Tree-ring Research*, **65**: 95–103.
- Lu JX, Xu JM, Wu YQ, *et al.* 2015. Climatic signals in wood property variables of *Picea crassifolia*. *Wood and Fiber Science Journal of the Society of Wood Science and Technology*, **47**: 131–140.
- Magnuszewski M, Bijak S, Orozumbekow A, *et al.* 2015. Different growth patterns of *Picea schrenkiana* subsp. *tianshanica* (Rupr.) Bykov and *Juglans regia* L. coexisting under the same ecological conditions in the Sary-Chelek Biosphere Reserve in Kyrgyzstan. *Dendrobiology*, **73**: 11–20.
- Rossi S, Rathgeber CBK, Deslauriers A. 2009. Comparing needle and shoot phenology with xylem development on three conifer species in Italy. *Annals of Forest Science*, **66**: 206–206.
- Subedi N, Sharma M. 2013. Climate-diameter growth relationships of black spruce and jack pine trees in boreal Ontario, Canada. *Global Change Biology*, **19**: 505–516.
- Tian QY, He ZB, Xiao SC, *et al.* 2017. Response of stem radial growth of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to environmental factors in the Qilian Mountains of China. *Dendrochronologia*, **44**: 76–83.
- Vicente-Serrano SM, Camarero JJ, Azorin-Molina C. 2014. Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography*, **23**: 1019–1030.
- Wang B, Chen T, Xu GB, *et al.* 2018. Anthropogenic-management could mitigate declines in growth and survival of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the east Qilian Mountains, northeast Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, **250**: 118–126.
- Wang WZ, Liu XH, Shao XM, *et al.* 2015a. Differential response of Qilian juniper radial growth to climate variations in the middle of Qilian Mountains and the northeastern Qaidam Basin. *Climatic Change*, **133**: 237–251.
- Wang ZY, Yang B, Deslauriers A, *et al.* 2015b. Intra-annual stem radial increment response of Qilian juniper to temperature and precipitation along an altitudinal gradient in northwestern China. *Trees: Structure and Function*, **29**: 25–34.
- Yang B, He MH, Melvin TM, *et al.* 2013. Climate control on tree growth at the upper and lower treelines: A case study in the Qilian Mountains, Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, **8**: e69065.
- Zhang LN, Jiang Y, Zhao SD, *et al.* 2017. Lingering response of radial growth of *Picea crassifolia* to climate at different altitudes in the Qilian Mountains, Northwest China. *Trees: Structure and Function*, **32**: 455–465.

作者简介 詹思敏,女,1998年生,本科在读,主要研究树木年轮与气候变化。E-mail: zhsm678@126.com
责任编辑 张敏
