

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0130

DU Miaomiao, ZHANG Fen, GOU Xiaohua, et al. Different responses of radial growth of *Picea crassifolia* to climate warming in the middle and eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):14–23. [杜苗苗, 张芬, 勾晓华, 等. 祁连山中东部青海云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):14–23.]

祁连山中东部青海云杉径向生长 对气候变暖的响应差异

杜苗苗¹, 张 芬¹, 勾晓华¹, 刘兰娅¹, 夏敬清¹, 吴秀平²

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 气候变暖对森林生态系统产生了深刻影响, 而树木生长对气候变化做出了不同的响应。本研究利用采自祁连山中、东部不同海拔梯度的青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮样本, 分别建立了中部和东部6个树轮宽度年表, 分析了树木径向生长与各气候要素的关系以及随时间变化的稳定性。结果表明: 祁连山中东部青海云杉对降水和scPDSI较东部更为敏感。中部树轮宽度年表与当年5—7月的scPDSI极显著正相关($P < 0.001$), 东部树轮宽度年表与前一年9月和当年5月scPDSI显著正相关, 表明中部LCH区域青海云杉径向生长主要受当年5—7月土壤水分条件的限制; 东部XYH区域则受前一年9月和当年5月的土壤水分的限制。20世纪80年代中东部温度显著升高($P < 0.001$), 中东部树木生长受高温引起的干旱胁迫增强; 20世纪90年代以后, 由于中部降水增加而东部降水变化不明显, 中部树木生长干旱压力得到缓解, 东部森林受干旱的限制作用增强。此外, 中东部青海云杉与温度、降水和scPDSI的相关关系逐渐趋向一致, 未来气候的持续变暖或许将减小中东部树轮-气候关系的差异。

关键词: 祁连山中东部; 青海云杉; 树轮宽度; 气候变暖; 响应差异

中图分类号: P461⁺.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0014-10

0 引言

气候变暖会导致森林生态系统的结构和功能发生变化, 影响着树木生长及其对气候的响应关系^[1-2]。利用树木年轮获取气候和环境变化信息, 在树木生长与气候变化研究中发挥着重要作用^[3]。然而随着气候变暖, D'Arrigo等^[4]发现北半球高纬或高海拔地区树木出现对温度“响应分异”现象, 在中低纬度地区树轮-气候响应分离现象也有报道^[5-8]。Dass等^[9]研究发现温度升高导致欧亚大陆北部植被总初级生产力增加, 而Allen等^[10]报道高温和干旱引起的全球树木死亡率上升。同时受区域气候的影响, 同一区域树木生长也会对气候变暖做出不同响应^[11]。由此可见, 气候变暖背景下, 树木对气候

变暖的反应变得更为复杂, 研究树轮-气候响应关系对于深刻理解气候变暖对森林生态系统的影响尤为重要。

祁连山地处青藏高原北缘, 河西走廊南侧, 处于青藏高原、内蒙古高原、黄土高原三大高原的交汇地带。祁连山森林生态系统在维系生物多样性、涵养水源和保障区域生态平衡方面都具有至关重要的作用^[12]。近几十年来, 祁连山地区气候暖湿化明显, 但存在空间差异, 其东段温度增加幅度较大, 中西段降水增加幅度较大^[13]。因此, 全面了解区域树木生长与气候变化的关系, 对预测未来森林生长能力和当地社会发展具有重要意义。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是祁连山区森林主

收稿日期: 2021-04-24; 修订日期: 2021-10-10

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0301); 国家自然科学基金项目(41771046; 41790422); 111引智项目: 111Project(BP2018001); 甘肃省创新基地和人才计划-省野外观测野外研究站项目(18JR2RA011)资助

作者简介: 杜苗苗, 硕士研究生, 主要从事树轮生态学研究. E-mail: dumm15@lzu.edu.cn

通信作者: 张芬, 讲师, 主要从事树轮生态学研究. E-mail: fzhang@lzu.edu.cn

要建群种,在祁连山北坡呈带状或者斑块状分布于海拔 2 700~3 300 m 的阴坡和半阴坡,分布面积占乔木林面积的 75.72%^[14]。青海云杉的生长对气候变化较敏感,目前已开展了大量树轮生态学和树轮气候学研究,这些研究主要围绕青海云杉径向生长与气候的关系,重建该地区的历史气候信息^[15-19]。祁连山东西长 800 多公里,不同区域生态环境和气候状况有很大差异。受区域气候环境条件和人类活动的影响,青海云杉林树木生长在东、中部存在空间不一致性,亟待理解不同区域气候变化特征下青海云杉对气候因子响应差异。本研究利用祁连山中、东部青海云杉的树轮宽度数据,明确不同区域树木生长与气候因子的关系,以及它们之间的关系是否长期稳定,这不仅对古气候重建至关重要,同时也能更好地理解全球变暖背景下森林动态变

化趋势,从而能够为森林管理决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(37.81°~38.81°N,99.69°~101.96°E)处于祁连山中东部地区,主要为中部肃南县隆畅河流域和东部永昌县西营河流域(图 1),属于温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季短暂温凉湿润,降水年内分配不均匀,主要集中在夏季,最高气温出现在 7 月,最低气温出现在 1 月(图 2)。中部地区气候更为干旱,东部地区相对湿润,土壤以灰褐色森林土为主。林下灌木主要以鬼箭锦鸡儿[*Caragana jubata* (Pall.) Poir.]、金露梅(*Dasiphora fruticosa* L.)和高山柳(*Salix oritrepha*)为主,草本主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum* L.)和针茅(*Stipa capillata* L.)等。

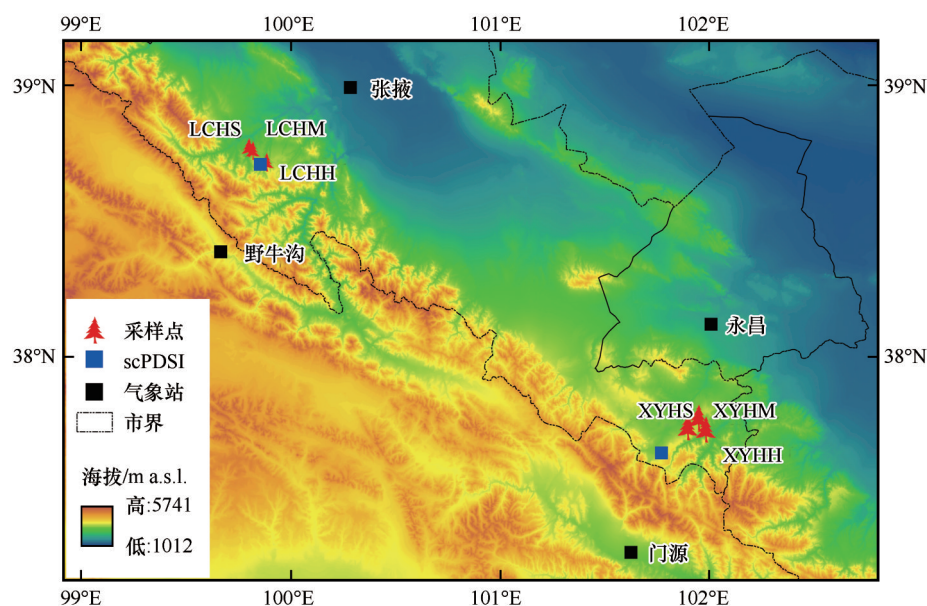


图 1 采样点及最近气象站和 scPDSI 格点位置

Fig. 1 Locations of sampling sites, the nearest weather station and scPDSI grid point

1.2 研究方法

1.2.1 样本采集与年表建立

2018 年 10 月份我们在祁连山中部和东部森林海拔 2 400~3 000 m 范围内分别每隔 200~300 m 进行采样(表 1,图 1),共采集了 6 个样方青海云杉样本,样方面积为 30 m×30 m。所有样地均为青海云杉纯林,避免了由于种间竞争等对树轮记录的气候信息的干扰。样地坡向均在北偏西 5°至北偏东 35°之间,坡度均在 25°~35°之间。采样时选取生长状况良好的树木,使用生长锥从每棵树 1.3 m 高的不同方位上取 2 个样芯,个别树木是一根打穿的样

芯,具体样本量信息见表 1。取到的样芯放置在塑料样管内,并在样管上用油性笔标注代码,并详细记录了每棵树的相对位置、树高、胸径、基径、冠幅等信息。

将野外采集的样芯按照树轮样品在实验室处理的基本步骤进行固定、打磨及初步的交叉定年。而后利用 Velmex 宽度测量仪在 0.001 mm 的水平上测定树轮宽度,然后用 CHFECHA 程序进行交叉定年和测量结果的检验^[20],以保证定年的准确性。利用 ARSTAN 程序的负指数函数或线性函数去除生长趋势和树木相互竞争的影响,对于拟合效果较

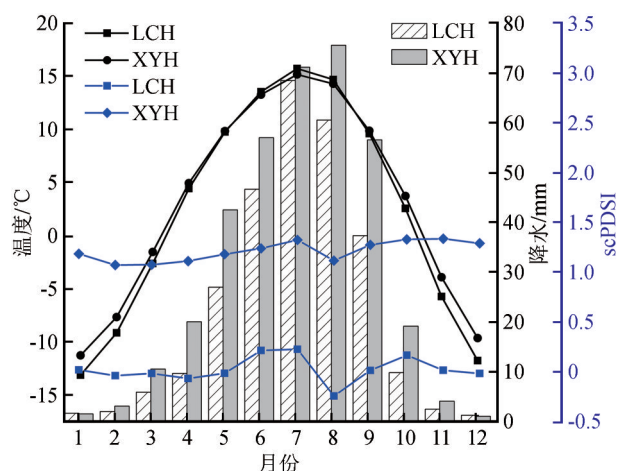


图2 研究区气象站多年(1959—2015年)月平均温度、降水和scPDSI(气温:柱状;降水:黑色点线;scPDSI:蓝色点线)

Fig. 2 The average monthly temperature and precipitation in the study area (1959—2015) (Temperature: bar charts; Precipitation: black point-and-figure chart; scPDSI: blue point-and-figure chart)

表1 树轮样点及scPDSI格点信息

名称	经度/E	纬度/N	海拔/m	样本量/(树/芯)
LCHS	99.69°	38.81°	2 400	70/136
LCHM	99.71°	38.80°	2 600	63/126
LCHH	99.78°	38.76°	2 952	52/107
XYHS	101.95°	37.82°	2 500	43/86
XYHM	101.96°	37.82°	2 764	27/49
XYHH	101.96°	37.81°	3 000	35/68
张掖	100.17°	39.05°	1 461	—
野牛沟	99.58°	38.42°	3 320	—
永昌	101.97°	38.23°	1 977	—
门源	101.61°	37.38°	2 788	—
scPDSI	99.75°	38.75°	—	—
	101.75°	37.75°	—	—

差的样芯,采用步长为序列长度67%的样条函数拟合,最终得到3种树轮年表:差值年表(RES)、自回归年表(ARS)及标准年表(STD)。本研究全部选用标准化年表进行相关研究分析。

1.3 气候资料

本研究选取距离采样点最近的两个气象站数据进行平均,以便更好地代表样点的气候环境。中部隆畅河样点(LCH)选取张掖、野牛沟气象站,东部西营河样点(XYH)选取永昌和门源气象站。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),所选用的气象要素指标有月平均气温、月总降水量(20:00—次日20:00)、月平均最高气温以及月平均最低气温数据。自校准帕尔默干旱指数(scPD-

SI)格点数据下载于荷兰皇家气象研究所数据共享网(<http://climexp.knmi.nl/start.cgi>),选择采样点最近的格点数据,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,时间跨度为1959—2015年。scPDSI是根据降水和温度的时间序列,以及与每个位置的土壤表面特性相关的固定参数来计算的,目的是使不同气候条件下的结果更具可比性,其结果对说明地区干旱情况也更具代表性^[21]。

1.4 研究方法

使用SPSS19.0软件计算了标准年表与前一年6月至当年9月各气候因子的Pearson相关系数,以期揭示树木径向生长的关键气候因子。为了减少年表和气候变量趋势(即温度趋势)的影响,还计算了年表和气象数据一阶差序列的Pearson相关系数。为进一步评估树木径向生长对主要气象因子的响应随时间变化的稳定性,以21 a为时间窗口,从1959年开始向后滑动计算其相关系数,通过1 000次重复采样的bootstrap方法,在 $\alpha = 0.05$ 水平下检验其显著性。滑动相关分析通过R语言中的treecim包完成。

2 结果与分析

2.1 研究区气候变化特征

从多年月平均降水、气温(图2)可以看出,中部LCH区域最热月7月平均气温为 15.73°C ,最冷月1月多年平均气温为 -13.13°C ,7月降水量最大为 68.48 mm ,雨热同期;东部XYH最高气温出现在7月为 15.17°C ,最低气温在1月多年平均为 -11.26°C ,8月降水量最大为 75.55 mm ,降水和气温峰值不同步。分析气象站过去几十年气候数据发现(图3),研究区年平均气温呈显著上升趋势($P < 0.001$),东部XYH $[0.345^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}, R^2 = 0.6704]$ 上升速率略高于中部LCH $[0.310^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}, R^2 = 0.5287]$;东部XYH区域年总降水量高于中部LCH区域,但中部LCH降水有显著增加趋势($P < 0.01$),而东部XYH年降水变化趋势不明显。

2.2 年表特征分析

年表统计特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表包含环境信息的多少。由表2可以看出,本研究所采用的6个标准年表样本解释总体解释量(EPS)远高于0.85的可接受程度,平均敏感度(M.S)、信噪比(SNR)都处于较高水平,表明标准年表具有较高的可信度,可以较好地反映研究区

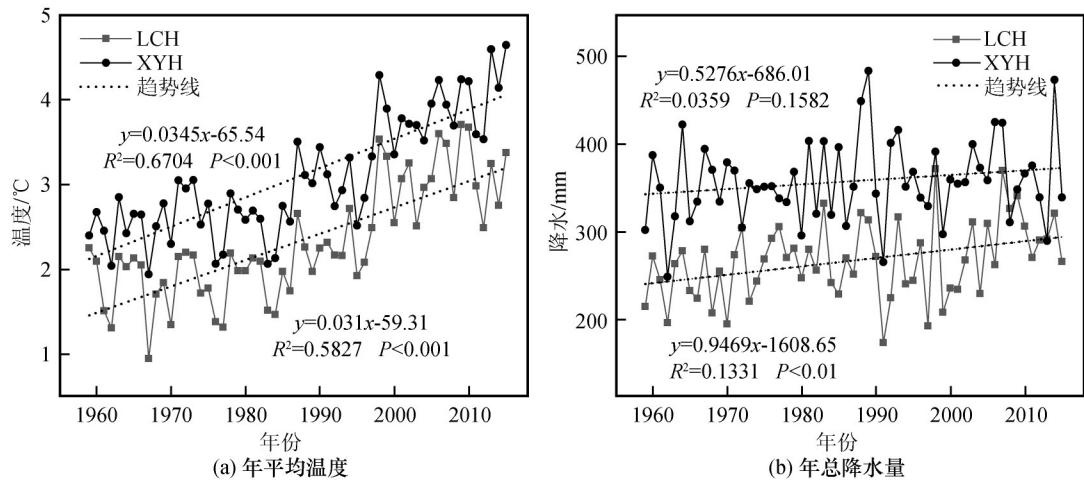


图3 研究区年平均温度(a)和年总降水量(b)

Fig. 3 Annual mean temperature (a) and annual total precipitation (b) in the study area

表2 树轮年表统计参数

统计特征	LCHS	LCHM	LCHH	XYHS	XYHM	XYHH
平均敏感度 M. S	0.387	0.309	0.253	0.312	0.234	0.218
树木间相关 R	0.611	0.512	0.432	0.589	0.477	0.406
一阶自回归系数 AC1	0.419	0.702	0.479	0.427	0.694	0.725
标准方差	0.187	0.390	0.283	0.334	0.352	0.332
第一主分量方差 PC1 (%)	67.1	62.6	59.9	64.9	60.2	53.0
样本总体解释量 EPS	0.992	0.989	0.983	0.990	0.970	0.968
信噪比 SNR	130.434	92.365	56.788	100.057	31.800	30.148
公共时段	1939—2018 年	1949—2018 年	1924—2018 年	1951—2018 年	1933—2018 年	1881—2018 年
可靠时段 (EPS>0.85)	1900—2018 年	1886—2018 年	1822—2018 年	1927—2018 年	1841—2018 年	1836—2018 年

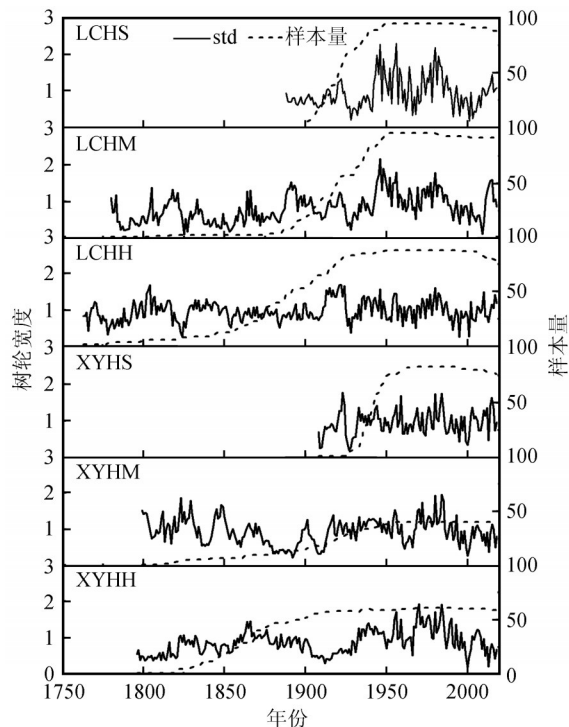


图4 青海云杉树轮宽度年表

Fig. 4 The tree-ring width chronologies of *Picea crassifolia*

气候变化。平均敏感度(M. S)东部较中部低且随海拔的升高而降低,表明低海拔和中部青海云杉径向生长对气候变化更敏感;一阶自回归系数(AC1)东部高于中部,表明东部青海云杉径向生长受前一年生长状况的影响较中部大。

2.3 树木径向生长对气候因子的响应

祁连山中东部青海云杉径向生长对温度因子的响应模式较为一致(图5)。主要表现为:中东部6个年表均与当年6—8月平均气温、平均最高气温显著负相关($P<0.05$),与前一年7—9月平均最高气温显著负相关,与平均最低气温的相关性普遍较低;另外,东部中、高海拔年表与当年2—4月平均气温、平均最高气温呈显著负相关($P<0.05$);进一步进行一阶差相关分析显示,中部低、中、高海拔年表与当年6月的平均气温,与当年6月和前一年8月平均气温、平均最高气温保持显著负相关($P<0.05$),东部低、中、高海拔年表与当年6月、前一年7月的平均气温,与当年6月、前一年8月、9月平均最高气温保持显著负相关($P<0.05$),这说明与其他月份温度因

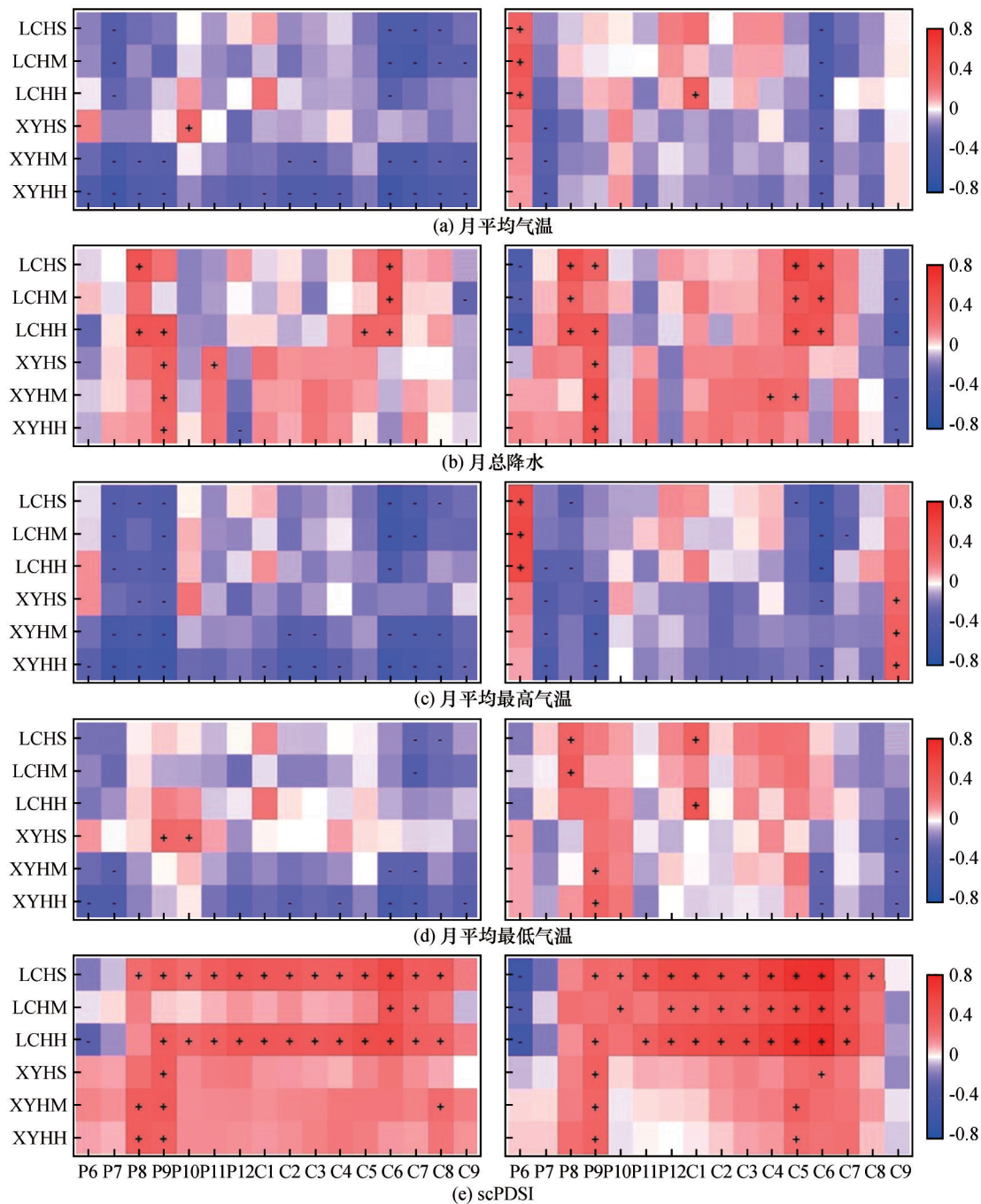


图5 STD年表与前一年6月至当年9月的月平均气温(a)、月总降水(b)、月平均最高气温(c)、月平均最低气温(d)和scPDSI(e)的相关分析(左)、一阶差相关分析(右),时间跨度为1959—2015年,P(Previous)表示前一年,C(Current)表示当年;右侧图例表示图中颜色所对应的相关系数值,红色越深表示正相关关系越强,蓝色越深表示负相关关系越强。“+”表示正相关超过95%的置信限,“-”表示负相关超过95%的置信限

Fig. 5 The correlation coefficients(left) and the first-order difference correlation coefficients(right)between the regional standard chronology and monthly mean temperature (a), monthly total precipitation (b), monthly meanmaximumtemperature (c), monthly mean minimum temperature (d) and scPDSI (e) from previous June to current September over the period1959—2015.

P:previous year,C:current year. The different color represent the correlation value, the darker the red, the stronger the positive correlation, and the darker the blue, the stronger the negative correlation. The “+”(“-”)indicates that the positive(negative) correlation exceeds a 95% confidence limit

子的相关性仅仅表现为趋势相关。差异。中部不同海拔梯度树轮宽度年表均与当年6月,前一年8月的降水显著正相关,东部的不同海拔

中东部青海云杉径向生长对降水的响应存在

年表与前一年9月降水显著正相关($P<0.05$)。经一阶差相关分析后,中部低、中、高海拔年表与当年5月、6月,前一年8月、9月降水的正相关增强,东部的低、中、高海拔年表与前一年9月降水正相关增强,仅中海拔XYHM与当年4月、5月降水达到显著正相关($P<0.05$)。

中东部青海云杉径向生长与scPDSI的相关性表现不一致。中部低海拔LCHS和高海拔LCHH年表与前一年9月至当年8月的scPDSI显著正相关,经一阶差相关分析后,中部的低、中、高海拔年表与前一年9月至当年7月的scPDSI均达到显著正相关($P<0.05$),与当年5—7月scPDSI相关系数较高(0.6以上),其中与6月scPDSI的相关系数(海拔从低到高:0.714,0.609,0.744, $P<0.001$)最高。东部

的低、中、高海拔年表与前一年8月、9月的scPDSI显著正相关,经一阶差分析后,三个海拔年表与前一年9月scPDSI保持显著正相关(海拔从低到高相关系数依次为:0.341,0.307,0.320, $P<0.05$),低海拔XYHS与当年6月,中海拔XYHM和高海拔XYHH与当年5月scPDSI呈显著正相关($P<0.05$)。

2.4 径向生长与气候要素关系的时间稳定性

为了评估祁连山中东部青海云杉树轮-气候响应关系随时间变化的稳定性(图6),计算了各年表与当年5—7月的平均气温、平均最高气温、最低气温、降水和scPDSI的21年滑动相关系数。结果显示:祁连山中东部青海云杉树轮宽度与温度因子的相关系数随时间变化趋势较为一致,20世纪70年代各年表与温度的负相关开始增强,80—90年代

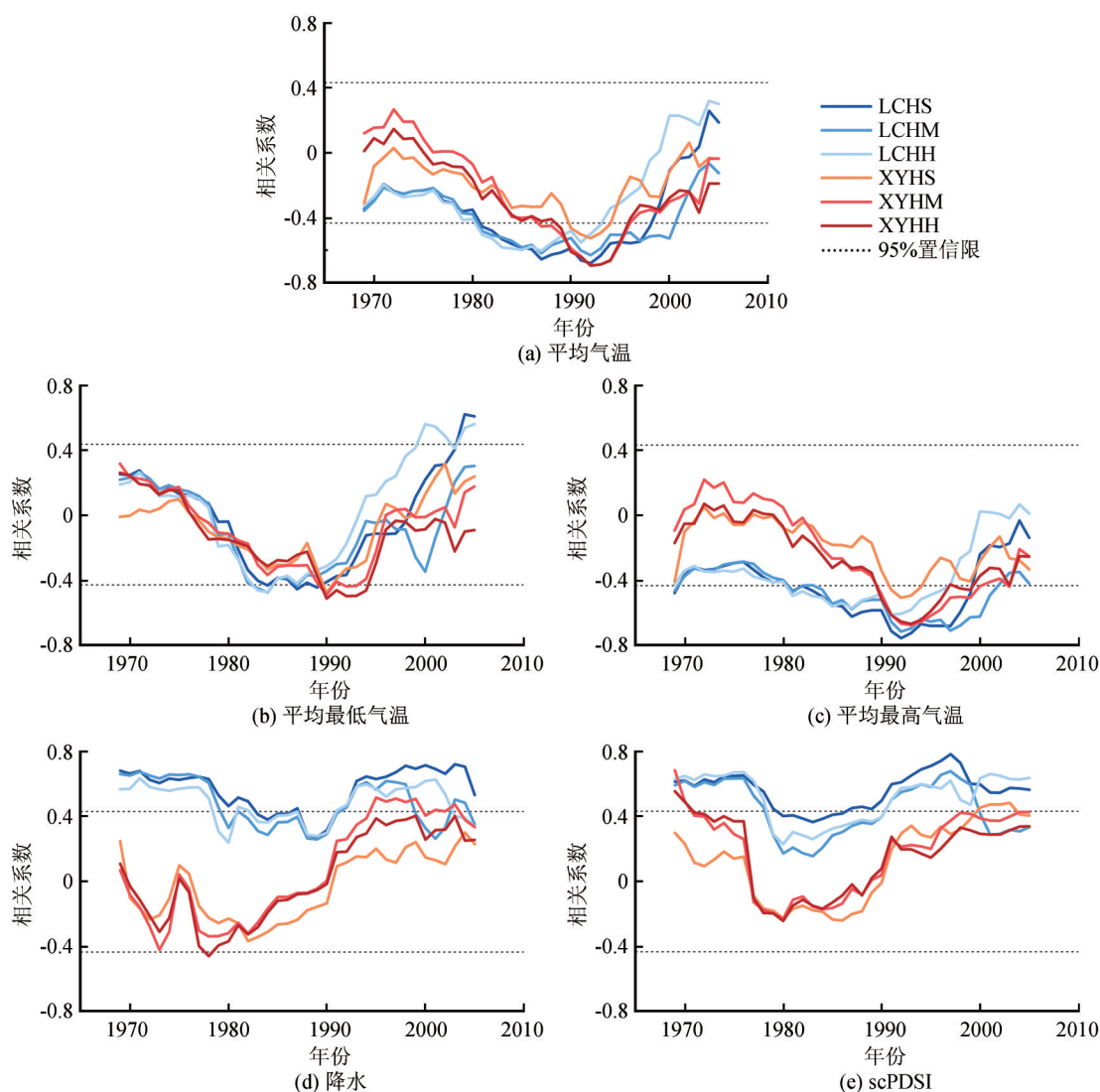


图6 STD年表和5—7月各气象要素的21年滑动相关分析

Fig. 6 Moving correlation analysis between tree-ring chronologies and climatic factors at each site.

The moving window is 21 years

呈现显著负相关($P<0.05$),90年代以后,负相关关系又开始减弱。中部低、中、高海拔年表与5—7月降水和scPDSI表现出持续的显著正相关($P<0.05$),表明中部树木生长对水分状况较为敏感,且较稳定。东部低、中、高海拔年表与降水的相关系数随着时间的变化,由不相关或负相关转变为正相关,在90年代以后达到显著正相关($P<0.05$),与scPDSI的相关系数随时间表现出先下降后上升的趋势,说明土壤水分条件对东部树木生长的限制作用逐渐增强。

3 讨论

3.1 中东部树轮—气候响应差异

祁连山中部(LCH)和东部(XYH)青海云杉径向生长对气候因子的响应存在明显的区域差异。研究区多年降水数据(图3)显示:中部LCH区域降水较东部XYH区域少(图3),说明中部气候可能较东部干旱。而中部LCH区域树轮宽度年表也表现出与当年5—7月scPDSI呈非常强的正相关($P<0.001$),同时与当年6月温度显著负相关,与当年5月、6月降水显著正相关($P<0.05$)(图5),这表明土壤水分条件是中部树木生长的重要限制因子,我国西北地区树木受土壤水分的限制这在许多研究中得到验证^[22-23]。5月上旬青海云杉早材细胞开始形成,6月是其高速生长期^[24],5、6月降水充沛,可以提高土壤含水量,缓解土壤水分亏缺,充足的水分供应可以促进树木生长季初期形成层细胞的产生、分化,并提高光合速率,使树木能够生产足够的碳水化合物来维持生长季初期的高速生长,从而使当年形成宽轮^[25-26];7月、8月份树木的径向生长主要是生成晚材细胞和加厚早材细胞壁^[24],虽然雨季带来较多的降水,但7月的高温会加剧土壤水分蒸发,而青海云杉喜阴湿环境,对土壤干旱条件敏感,但不耐旱^[27],因此5—7月的土壤水分条件是中部树木生长的限制因子。

东部树轮宽度对scPDSI敏感性普遍较低,仅表现出与当年5月和前一年9月的scPDSI显著正相关($P<0.05$),这可能是由于东部气候条件较中部湿润,而青海云杉最适生长区年降水量400 mm左右^[24],东部XYH地区气象站降水量为362.31 mm,山区降水量随海拔的增加率 $9.53 \text{ mm} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ^[28],样点附近降水量可以达到400 mm左右,降水基本能满足树木生长需求,因此东部仅仅受到生长季前

期(5月)土壤水分条件的限制。前一年生长季末期(8月、9月)的气候因子具有明显的“滞后效应”,这与研究区其他结果一致^[16,29]。前一年8月、9月丰沛的降水可以缓解同期高温引起的土壤干旱,土壤和树木体内就有可能储存较多的水分,降低树木遭受干旱胁迫的概率,同时有利于树木进行光合作用积累营养物质,为来年生长提供有利条件^[30-31]。气候因子的“滞后效应”在中部也有所体现,但其影响要弱于当年生长季土壤水分条件的限制。

另外,中东部树木径向生长也受到当年6月高温的影响。生长季温度过高会增强叶片蒸腾作用,树木为了减少水分散失会关闭气孔,从而限制了光合作用^[32];高温会降低与植物光合作用相关的酶的活性^[33],进而降低光合速率,减少碳水化合物的产生,导致当年形成窄轮^[34]。因此,东部树木生长虽然基本不受降水的限制,但生长季的高温同样不利于树木生长。东部中海拔(XYHM)和高海拔(XYHH)年表与当年6月平均最低气温显著负相关($P<0.05$),最低气温往往出现在夜间,低温升高会导致树木呼吸速率加快,对碳水化合物消耗增加,减少树木径向生长的营养物质供给,从而导致当年容易生成窄轮^[35]。此外,中东部的低、中、高海拔年表都与当年9月降水呈显著负相关,东部三个海拔年表与当年9月平均最高气温显著正相关,与平均最低气温呈显著负相关($P<0.05$),生长季末期温度偏高,能够延长植物的生长季,使当年容易形成宽轮^[36],但过多的降水不利于树木的木质化。

3.2 气候变暖对中东部青海云杉径向生长的影响

通过分析树木径向生长与气候关系的随时间变化的稳定性,以探讨气候变暖对中东部青海云杉生长的影响。结果显示,中东部树轮宽度与气候因子的相关系数都经历了先减小再增大的变化趋势,对温度的响应不稳定。这可能是由于20世纪80年代,祁连山地区经历了快速升温,而降水基本保持不变,高温和低降水导致树木受干旱的限制更为严重,因此中东部树轮宽度年表与生长季5—7月温度因子的负相关增强。Gao等^[37]也报道了祁连山区域在1980—2001年由变暖导致的青海云杉生长下降,Li等^[38]研究也发现了类似的结果。东部自20世纪80年代与降水和scPDSI的正相关性不断增强,到90年代左右达到显著正相关($P<0.05$),东部显现出5—7月土壤水分对树木生长的抑制作用,这可能跟降水变化趋势有关。Wen等^[39]研究表明:甘肃省变

暖趋势显著,但西部降水增加,东部降水减少;刘晓宏等^[40]对祁连山PDSI的重建结果显示,20世纪90年代开始呈现干旱趋势,这一干旱趋势和中国西北部的西部地区出现的变湿趋势相反^[41-42];其他相关研究表明:祁连山区域升温趋势显著,但中西部降水增加幅度高于东部^[13,43-44];同时对研究区多年平均降水分析结果(图3)显示:中部的LCH降水有显著增加趋势($P<0.01$),东部XYH变化趋势不明显,持续的变暖导致蒸发量增大,那么东部XYH区域未来可能会加剧干旱。因此,中东部虽然气候持续变暖,但中部降水的增多在一定程度上缓解了干旱压力,而东部森林将受到更为严重的土壤干旱限制。中东部青海云杉与温度、降水和scPDSI的相关关系逐渐趋向一致,未来气候的持续变暖或许将降低中东部树轮-气候关系的差异。

4 结论

本研究以祁连山中部和东部的青海云杉为研究材料,利用树木年轮学的方法建立了6个标准化树轮宽度年表,分析了不同区域不同海拔青海云杉径向生长与气象因子的响应特征,并分析标准化树轮宽度年表和主要限制因子的关系随时间变化的稳定性,得到以下结论:

(1)年表统计特征表明,6个年表平均敏感度、信噪比、标准差和样本对总体的代表性等特征参数都处于较高水平,可以很好地反映区域气候变化。

(2)中部的LCH区域青海云杉径向生长受当年5—7月土壤水分条件的限制;东部XYH区域则受前一年9月和当年5月土壤水分限制。

(3)中东部树木生长对温度的响应不稳定,东部XYH区域对降水和scPDSI响应不稳定;气温升高和降水无明显变化导致东部森林受土壤水分的限制增强,而未来气候的持续变暖或将减小中东部树轮-气候关系的差异。

参考文献(References):

- [1] Engelbrecht B M J. Forests on the brink[J]. *Nature*, 2012, 491(7426): 675-676.
- [2] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [3] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability[J]. *Science*, 2002, 295(5563): 2250-2253.
- [4] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the 'divergence problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes[J]. *Global and Planetary Change*, 2008,

60(3/4): 289-305.

- [5] Zhang Qing, Yu Ruide, Zheng Hongwei, et al. Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the eastern Tianshan mountains[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2018, 38(1): 14-25. [张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 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[J]. *植物研究*, 2018, 38(1): 14-25.]
- [6] Jiao Liang, Jiang Yuan, Zhang Wentao, et al. Assessing the stability of radial growth responses to climate change by two dominant conifer trees species in the Tianshan Mountains, northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 667-677.
- [7] Zhang Yongxiang, Wilmking M. Divergent growth responses and increasing temperature limitation of Qinghai spruce growth along an elevation gradient at the northeast Tibet Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(6): 1076-1082.
- [8] Li Teng, He Xingyuan, Chen Zhenju. Tree-ring growth responses of Mongolian Oak (*Quercus mongolica*) to climate change in southern Northeast: A case study in Qianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1841-1848. [李腾, 何兴元, 陈振举. 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应——以千山为例[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1841-1848.]
- [9] Dass P, Rawlins M A, Kimball J S, et al. Environmental controls on the increasing GPP of terrestrial vegetation across northern Eurasia[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(1): 45-62.
- [10] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [11] Li Junxia, Bai Xueping, Zhang Xianliang, et al. Different responses of natural *Pinus sylvestris* var. *mongolica* growth to climate change in southern and northern forested areas in the Great Xing'an Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21): 7232-7241. [李俊霞, 白学平, 张先亮, 等. 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[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7232-7241.]
- [12] Zhang Mingjun, Zhou Lihua. The forest ecosystem service and their valuation on Qilian Mountain[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2003, 28(1): 7-9. [张明军, 周立华. 祁连山水源涵养林生态系统服务价值估算[J]. *甘肃林业科技*, 2003, 28(1): 7-9.]
- [13] Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian mountains region in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(1): 85-90. [尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. *高原气象*, 2009, 28(1): 85-90.]
- [14] Tian Fengxia, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 62-72. [田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 等. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 62-72.]
- [15] Wang Yajun, Chen Fahu, Gou Xiaohua, et al. Study on response relationship between tree-ring and climate factors and climate reconstruction in middle region of qilianshan mountains [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(2): 135-140. [王亚军, 陈发虎, 勾晓华, 等. 祁连山中东部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(2): 135-140.]
- [16] Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. Characteris-

- tics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3268-3276. [彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 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[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3268-3276.]
- [17] Gou Xiaohua, Chen Fahu, Yang Meixue, et al. Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 172-176. [勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化[J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 172-176.]
- [18] Liang Eryuan, Shao Xuemei, Liu Xiaohong. Annual precipitation variation inferred from tree rings since A. D. 1770 for the western Qilian Mts., northern Tibetan Plateau [J]. *Tree-Ring Research*, 2009, 65(2): 95-103.
- [19] Wang Yamin, Feng Qi, Kang Xingcheng. Tree-ring-based reconstruction of temperature variability (1445—2011) for the upper reaches of the Heihe River Basin, Northwest China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(1): 60-76.
- [20] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 51-67.
- [21] Dai Aiguo. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [22] Li Zongshan, Chen Weiliang, Wei Jingshu, et al. Tree-ring growth responses of Liaodong Oak (*Quercus wutaishanica*) to climate in the Beijing Dongling Mountain of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 27-37. [李宗善, 陈维梁, 韦景树, 等. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 27-37.]
- [23] Liu Yu, Zhang Xinjia, Song Huiming, et al. Tree-ring-width-based PDSI reconstruction for central Inner Mongolia, China over the past 333 years [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48(3/4): 867-879.
- [24] Li Yan, Liang Eryuan, Shao Xuemei. Variations of *Picea crassifolia* tree-ring cell structure and their implications to past climate in eastern margin of Qaidam Basin, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 524-532. [李雁, 梁尔源, 邵雪梅. 柴达木盆地东缘青海云杉树轮细胞结构变化特征及其对气候的指示[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 524-532.]
- [25] Zhang Junzhou, Gou Xiaohua, Zhang Yongxiang, et al. Forward modeling analyses of Qilian Juniper (*Sabina przewalskii*) growth in response to climate factors in different regions of the Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Trees*, 2016, 30(1): 175-188.
- [26] Ren Ping, Rossi S, Camarero J J, et al. Critical temperature and precipitation thresholds for the onset of xylogenesis of *Juniperus przewalskii* in a semi-arid area of the north-eastern Tibetan Plateau [J]. *Annals of Botany*, 2017, 121(4): 617-624.
- [27] Wang Bo, Chen Tuo, Li Caijuan, et al. Radial growth of Qinghai spruce (*Picea crassifolia* Kom.) and its leading influencing climate factor varied along a moisture gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 476: 118474.
- [28] Huang Qi, Qin Guanghua, Wang Ruimin, et al. Analysis of spatial distribution characteristics of precipitation in Qilian Mountains based on MSWEP [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(2): 232-244. [黄琦, 覃光华, 王瑞敏, 等. 基于MSWEP的祁连山地区降水空间分布特性解析[J]. *水利学报*, 2020, 51(2): 232-244.]
- [29] Zhan Simin, Wang Keyi, Zhang Lingnan, et al. Species-specific growth responses to climatic factors in the eastern Qilian Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2007-2014. [詹思敏, 王可逸, 张凌楠, 等. 祁连山东部不同树种径向生长对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2019, 38(7): 2007-2014.]
- [30] Gao Linlin, Gou Xiaohua, Deng Yang, et al. Dendroclimatic response of *Picea crassifolia* along an altitudinal gradient in the eastern Qilian Mountains, northwest China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2013, 45(4): 491-499.
- [31] Liang Eryuan, Wang Yafeng, Xu Yan, et al. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the sygera mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees*, 2010, 24(2): 363-373.
- [32] Li Ximeng, Blackman C J, Choat B, et al. Tree hydraulic traits are coordinated and strongly linked to climate-of-origin across a rainfall gradient [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41(3): 646-660.
- [33] Kobza J, Edwards G E. Influences of leaf temperature on photosynthetic carbon metabolism in wheat [J]. *Plant Physiology*, 1987, 83(1): 69-74.
- [34] Hart S J, Laroque C P. Searching for thresholds in climate-radial growth relationships of Engelmann spruce and subalpine fir, Jasper National Park, Alberta, Canada [J]. *Dendrochronologia*, 2013, 31(1): 9-15.
- [35] Atkin O K, Scheurwater I, Pons T L. Respiration as a percentage of daily photosynthesis in whole plants is homeostatic at moderate, but not high, growth temperatures [J]. *The New Phytologist*, 2007, 174(2): 367-380.
- [36] Fritts H. *Tree rings and climate* [M]. New York: Academic Press, 1976.
- [37] Gao Linlin, Gou Xiaohua, Deng Yang, et al. Increased growth of Qinghai spruce in northwestern China during the recent warming hiatus [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260: 9-16.
- [38] Yu Li, Huang Lei, Shao Xuemei, et al. Warming-induced decline of *Picea crassifolia* growth in the Qilian mountains in recent decades [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129959.
- [39] Wen Xiaohu, Wu Xiaoqing, Gao Meng. Spatiotemporal variability of temperature and precipitation in Gansu Province (Northwest China) during 1951—2015 [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 197: 132-149.
- [40] Liu Xiaohong, An Wenling, Liang Eryuan, et al. Spatio-temporal variability and climatic significance of tree ring's $\delta^{13}\text{C}$ of *Picea crassifolia* on the Qilian mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 666-676. [刘晓宏, 安文玲, 梁尔源, 等. 祁连山青海云杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的时空变化及其气候意义[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 666-676.]
- [41] Li Jinbao, Gou Xiaohua, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7): L07715.
- [42] Zou Xukai, Zhai Panmao, Zhang Qiang. Variations in droughts over China: 1951—2003 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): L04707.
- [43] Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5846-5855. [姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5846-5855.]
- [44] Xiao Liangui, Shi Mingzhang, La Yuxian, et al. Characteristics of Precipitation Changes in the Qilian Mountains during

1961—2019 [J]. Qinghai Science and Technology, 2020, 27 (5): 76-80. [肖莲桂, 石明章, 喇玉先, 等. 1961—2019 年祁

连山地区降水变化特征分析[J]. 青海科技, 2020, 27(5): 76-80.]

Different responses of radial growth of *Picea crassifolia* to climate warming in the middle and eastern Qilian Mountains

DU Miaomiao¹, ZHANG Fen¹, GOU Xiaohua¹, LIU Lanya¹, XIA Jingqing¹, WU Xiuping²

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Global climate warming has profound effects on forest ecosystems. Whether the environmental context affects the response of tree growth to climate change remains unknown. In this study, three tree-ring chronologies of *Picea crassifolia* at different elevation gradients were developed in the middle and eastern Qilian Mountains, respectively. The relationship between radial growth of trees and climatic factors and its stability with time were analyzed. Results showed that the *Picea crassifolia* in the middle of Qilian Mountains was more sensitive to precipitation and scPDSI than that in the eastern. The tree-ring width chronology was positively correlated with scPDSI from May to July of the current year in the middle of the Qilian Mountains ($P < 0.001$), and the eastern Qilian Mountains tree-ring width was significantly positively correlated with scPDSI in previous September and current May. It indicated that the tree growth of *Picea crassifolia* was mainly restricted by the soil moisture conditions from May to July of the current year in the middle of the mountains (LCH). The eastern regions (XYH) was limited by soil moisture in September of previous year and May of the current year. As the temperature increased significantly since 1980s ($P < 0.001$), the drought stress for tree growth was enhanced in the central and eastern regions, which caused by high temperature. After 1990s, due to the increase of precipitation in the central region and the insignificant change in the eastern region, the drought stress of tree growth in the Middle region was relieved, but it was enhanced in the eastern region. In addition, the correlation between temperature, precipitation and scPDSI of *Picea crassifolia* is gradually consistent in the middle and eastern Qilian Mountains, and the future climate warming may reduce the difference of tree-ring climate relationship of *Picea crassifolia* in the middle and eastern Qilian Mountains.

Key words: the middle and eastern Qilian Mountains; *Picea crassifolia*; tree-ring; climate warming; different response

(责任编辑: 徐国保)