

DOI: 10.5846/stxb202108022102

蔡家庆, 薛峰, 袁帅, 赵泽芳, 崔明皓, 史丹丹, 江源. 德令哈地区柏树山不同生境气候对祁连圆柏径向生长的影响. 生态学报, 2022, 42(16): 6758-6767.

Cai J Q, Xue F, Yuan S, Zhao Z F, Cui M H, Shi D D, Jiang Y. Impacts of climate on the radial growth of *Sabina przewalskii* in different habitats in Baishu Mountain, Delingha region, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6758-6767.

德令哈地区柏树山不同生境气候对祁连圆柏径向生长的影响

蔡家庆^{1,2}, 薛峰^{1,2}, 袁帅^{1,2}, 赵泽芳^{1,2}, 崔明皓^{1,2}, 史丹丹^{1,2}, 江源^{1,2,*}

1 北京师范大学中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要:为探究德令哈地区柏树山不同生境气候对祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)径向生长的影响,在该区域设置3个采样点(S1:地势较低的陡坡地,S2:坡度缓和的凹形坡地,S3:地势较高的陡坡地),运用树木年轮学方法收集了58棵祁连圆柏共113根样芯。通过建立3个样点的祁连圆柏差值年表,分析在半干旱区不同生境内祁连圆柏径向生长对气候响应的特征以及气候因子对祁连圆柏径向生长的贡献。结果表明:不同生境的祁连圆柏径向生长对降水的响应基本一致,对温度的响应则存在显著差异,其中当年5月的降水对不同生境祁连圆柏径向生长的贡献作用最大($P < 0.01$),当年6月的降水次之($P < 0.05$)。温度对S1和S3祁连圆柏径向生长的贡献均不显著($P > 0.05$)。当年9月的平均最高温对S2祁连圆柏径向生长有显著的贡献作用($P < 0.05$),低温对其的贡献并不显著($P > 0.05$)。研究结果论证了受地形差异的影响,不同生境下的气候对树木径向生长的影响具有多样性。因此,在研究树木生长与气候的关系时,应综合考虑不同生境的特点,以选取适宜的生境进行科学研究。

关键词:祁连圆柏;径向生长;树轮;生境;径向生长-气候关系;贡献

Impacts of climate on the radial growth of *Sabina przewalskii* in different habitats in Baishu Mountain, Delingha region, China

CAI Jiaqing^{1,2}, XUE Feng^{1,2}, YUAN Shuai^{1,2}, ZHAO Zefang^{1,2}, CUI Minghao^{1,2}, SHI Dandan^{1,2}, JIANG Yuan^{1,2,*}

1 Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: We set up three sampling sites (S1: steep hillslope with lower terrain, S2: hollow hillslope with gentle slope, S3: steep hillslope with higher terrain) and collected a total of 113 cores from 58 *Sabina przewalskii* using dendrochronological methods in Baishu Mountain of the Delingha region to investigate the impacts of climate on the radial growth of *S. przewalskii* in different habitats. By establishing the residual chronologies of *S. przewalskii* at the three sampling sites, we analyzed the response characteristics of the radial growth of *S. przewalskii* to climate and the contribution of the climate factors to the radial growth of *S. przewalskii* in different habitats in the semi-arid area. Results revealed that the radial growth of *S. przewalskii* in different habitats had basically same response to precipitation, but the response to temperature was of significant difference. The precipitation in May of the current year contributed the most to the radial growth of *S. przewalskii* in different habitats ($P < 0.01$), followed by the precipitation in June of the current year ($P < 0.05$).

基金项目:国家自然科学基金项目(41771051,41630750)

收稿日期:2021-08-02; 网络出版日期:2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangy@bnu.edu.cn

The contribution of temperature to the radial growth of *S. przewalskii* at S1 and S3 was not significant ($P>0.05$). The mean maximum temperature in September of the current year had a significant contribution to the radial growth of *S. przewalskii* at S2 ($P<0.05$), while the contribution of low temperature to it was not significant ($P>0.05$). The results demonstrated that the effects of climate in different habitats on the radial growth of trees were diversified under the influence of the difference in topography. Therefore, the characteristics of different habitats should be considered comprehensively before studying the relationship between tree growth and climate to select suitable habitats for scientific research.

Key Words: *Sabina przewalskii*; radial growth; tree ring; habitats; radial growth-climate relationship; contribution

树木作为森林生态系统的主体,其生长不仅受到自身遗传特征的控制,同时还受到所处生境的影响。一般认为,半干旱区树木的生长主要受水分条件的控制,随着海拔的增加,高海拔处的树木生长通常还受低温的限制作用^[1-2]。然而复杂的地形,包括地形形态^[3-4]、海拔高度^[5-6]和坡向坡位^[7-9]等,能够导致温度、降水以及土壤水分的差异^[10]。由于生境异质性,不同生境内气候因子对同一树种的生长影响可能存在差异^[3,11]。

柴达木盆地东北部分布着大面积的高山山地,具有独特的地形和高寒干旱的气候特征^[12-13]。祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)是这个区域的优势针叶树种^[14-15],也是我国目前成功重建过去千年树木年轮宽度序列的主要树种^[16-17],这对于获得该地区千年以来的气候变化信息具有重要作用^[18-19]。由于在该区域分布广泛且对气候变化敏感,祁连圆柏的树轮气候学研究潜力得到肯定^[3, 20-22]。研究发现在地形因素的影响下,不同生境的气候对祁连圆柏径向生长的影响存在差异。郑永宏等^[23]发现祁连圆柏在其分布上限,气候对其径向生长的影响与分布在中部、下限及水分条件相对较好的凹地的差异较大,具体表现为仅森林上限的祁连圆柏径向生长不受生长季降水的限制,前一年11月低温对其有显著的限制作用。Qin等^[24]发现在海拔3500—3900 m,祁连圆柏径向生长除了受生长季降水的限制,还受到前一年10月到当年3月平均温度的限制作用。也有研究指出,无论生长在何种生境的祁连圆柏,其径向生长均受生长季降水的限制,对温度的响应较弱,表现出一一致的年际变化模式^[21-22]。近年来的研究表明,柴达木盆地大部分地区自1998年以来降水量持续增加,增暖过程明显^[13,21]。因此,当地生境的气候信号可能发生变化,致使气候对祁连圆柏径向生长影响发生变化^[25]。在地形因素的影响下,树木生长对气候信号响应的复杂性加上气候变化的影响使得该地区不同生境的气候对祁连圆柏径向生长的影响尚不明确。

在柴达木盆地东北部开展树木年轮研究十分丰富,与地形因素相关的研究多集中于海拔高度差异和坡向坡位差异导致的同一区域内树木径向生长对气候响应不一致,而有关地形形态差异导致的气候因子对同一区域内树木径向生长的相对贡献的研究较少。因此,本研究在柴达木盆地东北部德令哈地区的柏树山选择3个生境不同的样地,即地势较低的陡坡地(S1)、坡度缓和的凹形坡地(S2)和地势较高的陡坡地(S3)进行样本采集。运用树木年轮学方法开展研究,主要目的在于揭示不同生境的气候对祁连圆柏径向生长的影响,为开展科学研究选取生境提供科学依据。我们的科学假设是,(1)由于该地区气候干旱,降水对不同生境的祁连圆柏径向生长均有限制性影响,(2)在地形差异的影响下,降水对地势较低的生境的祁连圆柏径向生长贡献较大,温度对凹形坡地和地势较高的生境的祁连圆柏径向生长贡献较大。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省德令哈地区的柏树山(37°10′—37°20′N,96°49′—97°30′E)(图1)。柏树山是宗务隆山的一条支脉,平均高程4000 m,属于深切中高山区。研究区地势陡峻,基岩裸露,植被盖度低,祁连圆柏疏林是该地区的主要森林植被类型。根据德令哈气象站(37°22′12″N,97°22′48″E)气候数据(1956—2018年),该地区全年水热同期,降水主要集中在5—9月,占全年总降水量的85%。年平均温度(MAT)为4.0℃,年降水量(MAP)为182.0 mm(图2)。

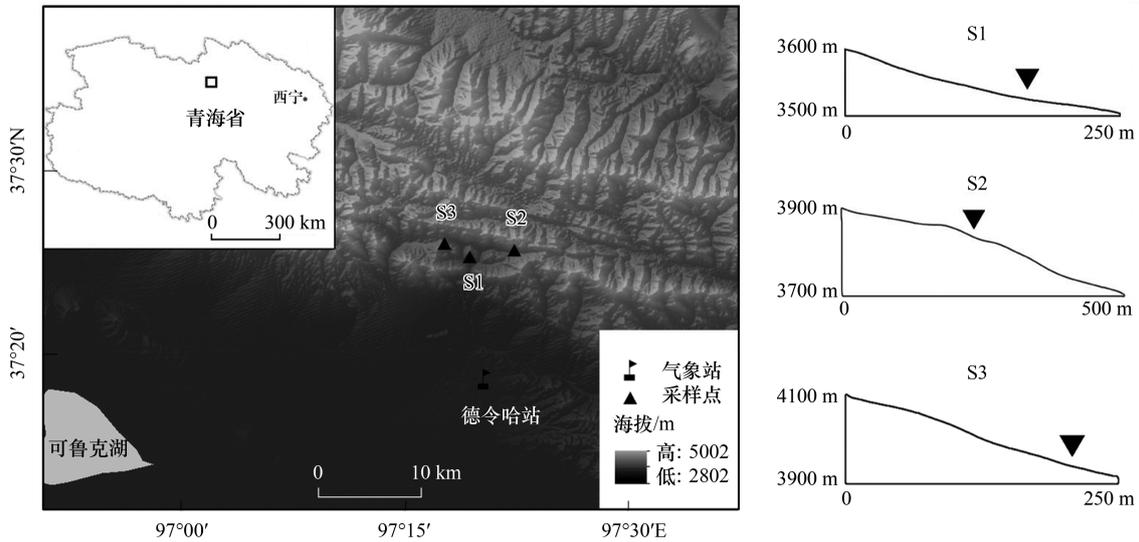


图1 研究区概况图与地形剖面图

Fig.1 The overview and topographic profile of the study area

S1: 地势较低的陡坡地 Steep hillslope with lower terrain; S2: 坡度缓和的凹形坡地 Hollow hillslope with gentle slope; S3: 地势较高的陡坡地 Steep hillslope with higher terrain. 黑色倒三角形表示采样点

1.2 样本采集

2019年6月,在柏树山阳坡地势较低的陡坡地(S1)、坡度缓和的凹形坡地(S2)和地势较高的陡坡地(S3)分别设置3个采样样地(表1)。在布设好的采样点内设置一个20 m × 20 m的样方,选取生长良好、种间竞争较小、无病虫害、无被火烧雷击的健康目标树并记录样地信息,在目标树胸径(约1.3 m)处使用直径为5.15 mm的生长锥沿垂直于坡向和平行于坡向的两个方向分别钻取样芯。每个样地采集25棵目标树的树木样芯。S3样地只采集了18棵目标树的样芯,原因在于该样地位于山坡顶部,只能找到18棵符合条件的样树。

1.3 树轮年表建立

对采集的样芯样本进行晾干、固定和打磨处理^[26]。软件NIS-Elements具有超分辨率成像的特点及拍摄、测量长度的功能,能清晰成像祁连圆柏多年密集的样芯。使用显微镜和NIS-Elements结合的方法,对打磨好的样芯拍照并进行交叉定年。然后使用NIS-Elements软件在0.001 mm精度下对所拍树轮照片定标并测量其年轮宽度。运用COFECHA程序对测量的结果进行检验^[27],剔除与主序列定年结果相差较大的样芯,共获得113根样芯(58棵树)。运用ARSTAN软件^[28],采用步长为67%样芯序列长度的样条函数去除序列中与树龄及树木之间干扰竞争等生长趋势的影响,对去除趋势后的序列以双重平均法进行原始树轮宽度年表的标准化处理。最终选取3个采样点树轮序列的差值年表作后续分析。

1.4 数据处理与分析

气候数据来源于德令哈气象站观测数据。本研究选取德令哈气象站1956—2018年前一年10月到当年

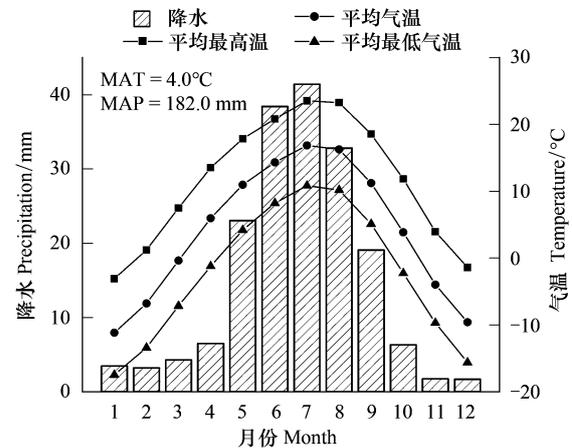


图2 德令哈气象站1956—2018年月总降水、月平均最高温、月平均温度和月平均最低温

Fig.2 Monthly climate factors at the Delingha Meteorological Station (1956–2018)

MAT: 年平均温度 Mean annual temperature; MAP: 年降水量 Mean annual precipitation

11 月的逐月平均气温和逐月总降水量作为水热条件参数开展分析。

表 1 采样点信息

Table 1 Information for the sampling sites

| 地点 Site | 纬度 Latitude/(°) | 经度 Longitude/(°) | 坡向 Aspect | 坡度 Slope/(°) | 胸径 Diameter at breast height/cm | 树高 Tree height/m | 海拔 Elevation/m |
|------------|--------------------|---------------------|--------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------|-------------------|
| S1 | 37.48 | 97.35 | 南 | 33 | 22.7±4.0 | 4.7±0.9 | 3520—3600 |
| S2 | 37.49 | 97.40 | 西南 | 20 | 24.2±5.2 | 5.8±1.6 | 3750—3866 |
| S3 | 37.49 | 97.32 | 东南 | 45 | 25.7±4.4 | 4.5±0.6 | 3900—3950 |

S1: 地势较低的陡坡地 Steep hillslope with lower terrain; S2: 坡度缓和的凹形坡地 Hollow hillslope with gentle slope; S3: 地势较高的陡坡地 Steep hillslope with higher terrain

采用 SPSS 19.0(1) 分别计算祁连圆柏树轮宽度指数与年气候因子和月气候因子的 Pearson 相关系数, 分析祁连圆柏径向生长对气候的响应; (2) 建立岭回归模型, 分析不同气候因子对祁连圆柏径向生长的贡献^[29]。多元线性回归模型的准确性基于自变量相互独立的假设^[30], 而岭回归模型不要求自变量之间相互独立, 消除了自变量之间由于存在高度相关关系而使模型估计不准确的影响, 因此本文选取岭回归模型建立树轮宽度指数与气候因子的关系。

2 结果与分析

2.1 年表统计特征

3 个样点 S1、S2、S3 年表的信噪比分别为 33.626、10.600 和 9.240, 所有样点的样本总体代表性均超过 0.85 的阈值, 这表明 3 个样点的年表是可靠的。同时, 我们发现 S1 年表的其他参数, 如平均敏感度, 标准差, 全序列平均相关系数, 树间平均相关系数, 树内平均相关系数和第一主成分方差解释率 (%) 也高于 S2 和 S3, 表明相比 S2 和 S3, S1 的祁连圆柏宽度年表包含更强的信号, 并且对气候更敏感(表 2)。

表 2 3 个样点祁连圆柏差值年表统计特征(公共区间 1956—2018 年)

Table 2 Dendrochronological characteristics of residual chronologies of *Sabina przewalskii* on south-facing slopes at three different sites (common period 1956—2018)

| 统计特征 Dendrochronological characteristics | S1 | S2 | S3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| 序列长度 Time span | 1827—2018 | 1735—2018 | 1732—2018 |
| SSS ≥ 0.85 起始年 Starting year | 1828 | 1799 | 1732 |
| 样本(芯/树) No. of sampled (cores/trees) | 41/21 | 42/22 | 30/15 |
| 平均敏感度 Mean sensitivity | 0.624 | 0.384 | 0.485 |
| 标准偏差 Standard deviation | 0.485 | 0.311 | 0.381 |
| 全序列平均相关系数 All series mean correlation | 0.584 | 0.298 | 0.480 |
| 树间平均相关系数 Between-trees mean correlation | 0.567 | 0.293 | 0.474 |
| 树内平均相关系数 Within-trees mean correlation | 0.823 | 0.448 | 0.617 |
| 信噪比 Signal-to-noise ratio | 33.626 | 10.600 | 9.240 |
| 样本总体代表性 Expressed population signal | 0.971 | 0.914 | 0.902 |
| 第一主成分方差解释量 1st principal component explained variance/% | 60.8 | 35.6 | 53.7 |

SSS: 子样本信号强度 Subsample signal strength

2.2 祁连圆柏径向生长与气候因子的响应关系

通过将不同生境祁连圆柏年轮宽度指数与前一年 10 月到当年 11 月的年平均最高温、年平均温度、年平均最低温和年总降水量进行 Pearson 相关分析(图 3), 结果显示, 3 个样点的祁连圆柏年轮宽度指数均与年总降水量呈显著正相关关系($P < 0.05$), 其中 S1 与年降水量的相关性最高($r = 0.453$), S3 次之($r = 0.368$), S2 的相关性最低($r = 0.281$)。3 个样点中仅有 S2 的祁连圆柏径向生长对年平均温度和年平均最低温显著响应

($P < 0.05$)。

将不同生境祁连圆柏年轮宽度指数与前一年 10 月到当年 11 月的月平均最高温、月平均温度、月平均最低温、月总降水量进行 Pearson 相关分析(图 3),结果显示在月尺度上,不同样点的祁连圆柏年轮宽度指数均与当年 5 月和当年 6 月的总降水量呈显著正相关关系($P < 0.05$),从不同样点祁连圆柏径向生长对温度的响应关系来看,S1 表现出与当年 6 月平均最高温和当年 6 月平均温度呈显著负相关关系($P < 0.05$),S3 表现出与当年 6 月平均最高温呈显著负相关关系($P < 0.05$),S2 则表现出与当年 9 月平均最高温,前一年 11 月和前一年 12 月的月平均温度,前一年 11 月和前一年 12 月以及当年 1 月、5 月、7 月、11 月的平均最低温均呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

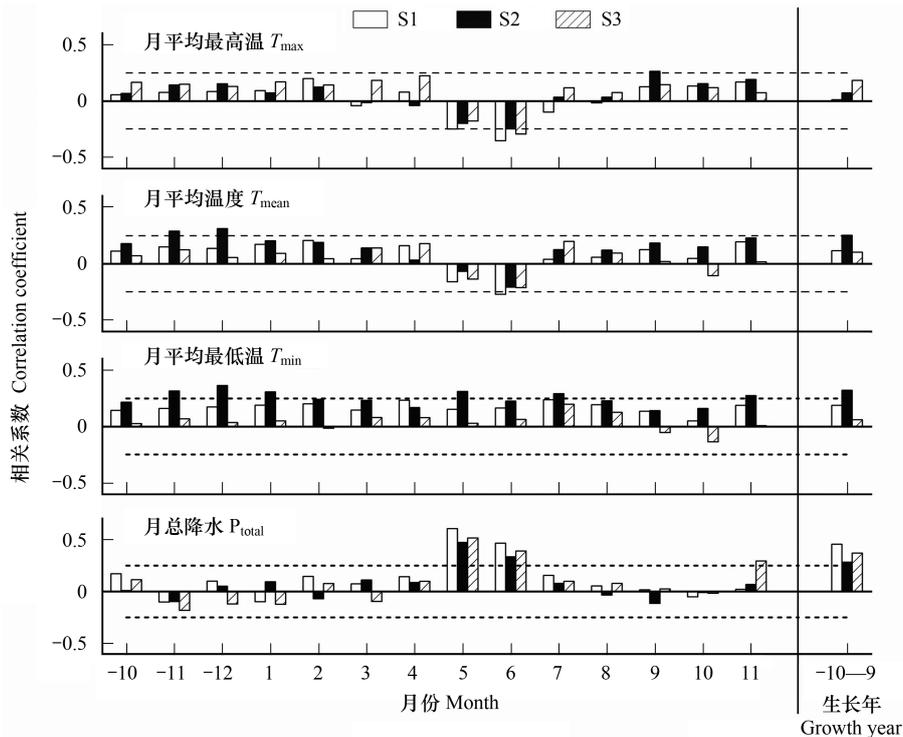


图 3 树木年轮宽度指数与前一年 10 月到当年 11 月的单月气候因子以及前一年 10 月到当年 9 月的年气候因子之间的相关性 (1956—2018)

Fig.3 Correlation between ring-width indices and monthly climate factors from prior October to current November and annual climate factors from prior October to current September (1956—2018)

T_{max} : 平均最高温 Mean maximum temperature; T_{mean} : 平均温度 Mean temperature; T_{min} : 平均最低温 Mean minimum temperature; P_{total} : 总降水 Total precipitation. 虚线表示 0.05 水平的显著性。月份前的“-”表示上一年,如-10 表示上一年 10 月份,-10—9 表示上一年 10 月到当年 9 月

2.3 气候因子对祁连圆柏径向生长的贡献

建立不同样点祁连圆柏年轮宽度指数与显著相关的气候因子($P < 0.05$)的岭回归方程,当 $k = 0.6$ 时,所有气候因子的归一化系数趋于逐渐稳定,因此,本研究将 k 的最佳值设为 0.6 以评估岭回归方程。如表 3 所示,S1、S2、S3 的岭回归方程的调整 R^2 分别为 0.430、0.312、0.312, F 检验极显著($P = 0.000$),其 F 统计量分别为 10.209、4.461、10.207,表明岭回归方程拟合结果良好。

从岭回归方程的标准化系数可以看出,在 S1 和 S3 样点中,仅当年 5 月降水和当年 6 月降水贡献显著($P < 0.01$),温度变量的标准化系数均小于降水变量($P > 0.05$),说明温度对 S1 和 S3 的祁连圆柏宽度指数贡献并不显著。在 S2 样点中,当年 5 月降水标准化系数最大($P < 0.01$),其次是当年 6 月降水($P < 0.05$)和当年 9 月平均最高温($P < 0.05$),说明当年 5 月降水、当年 6 月降水和当年 9 月平均最高温对 S2 祁连圆柏年轮宽度指

数均有显著贡献作用,其余月份温度变量对其贡献并不显著($P>0.05$)。

表 3 岭回归分析结果

Table 3 Ridge regression results

| 样点 Site | 解释变量 Explanatory variables | 非标准化系数 Non-standardized coefficients | | 标准化系数 Standardized coefficients | <i>t</i> | <i>P</i> | R^2 | 调整 R^2 | <i>F</i> |
|------------|----------------------------------|--|--------------------------|---------------------------------------|----------|----------|-------|-------------|-----------------------------------|
| | | <i>B</i> | 标准误 Standard error | Beta | | | | | |
| S1 | 常数 | 1.928 | 0.620 | - | 3.108 | 0.003 ** | 0.477 | 0.430 | $F(5,56) = 10.209$ $P = 0.000$ |
| | cP5 | 0.008 | 0.001 | 0.341 | 5.691 | 0.000 ** | | | |
| | cP6 | 0.004 | 0.001 | 0.233 | 3.991 | 0.000 ** | | | |
| | cTX5 | -0.031 | 0.021 | -0.086 | -1.447 | 0.153 | | | |
| | cTX6 | -0.027 | 0.014 | -0.076 | -1.855 | 0.069 | | | |
| | cT6 | -0.015 | 0.019 | -0.037 | -0.810 | 0.421 | | | |
| S2 | 常数 | 0.348 | 0.283 | - | 1.230 | 0.224 | 0.402 | 0.312 | $F(8,53) = 4.461$ $P = 0.000$ |
| | cP5 | 0.003 | 0.001 | 0.268 | 4.042 | 0.000 ** | | | |
| | cP6 | 0.001 | 0.001 | 0.163 | 2.445 | 0.018 * | | | |
| | cTX9 | 0.029 | 0.012 | 0.158 | 2.386 | 0.021 * | | | |
| | pTN12 | 0.005 | 0.004 | 0.074 | 1.264 | 0.212 | | | |
| | cTN1 | 0.004 | 0.004 | 0.066 | 1.067 | 0.291 | | | |
| | cTN7 | 0.010 | 0.010 | 0.066 | 1.004 | 0.320 | | | |
| | cTN5 | 0.009 | 0.009 | 0.063 | 0.979 | 0.332 | | | |
| | pTN11 | 0.002 | 0.006 | 0.024 | 0.397 | 0.693 | | | |
| S3 | 常数 | 1.317 | 0.436 | - | 3.019 | 0.004 ** | 0.346 | 0.312 | $F(3,58) = 10.207$ $P = 0.000$ |
| | cP5 | 0.006 | 0.001 | 0.308 | 4.634 | 0.000 ** | | | |
| | cP6 | 0.003 | 0.001 | 0.197 | 3.074 | 0.003 ** | | | |
| | cTX6 | -0.029 | 0.020 | -0.090 | -1.402 | 0.166 | | | |

cP5: 当年5月降水 Precipitation in current May; cP6: 当年6月降水 Precipitation in current June; cTX5: 当年5月平均最高温 Mean maximum temperature in current May; cTX6: 当年6月平均最高温 Mean maximum temperature in current June; cTX9: 当年9月平均最高温 Mean maximum temperature in current September; cT6: 当年6月均温 Mean temperature in current June; pTN11: 前一年11月最低温 Mean minimum temperature in previous November; pTN12: 前一年12月最低温 Mean minimum temperature in previous December; cTN1: 当年1月最低温 Mean minimum temperature in current January; cTN5: 当年5月最低温 Mean minimum temperature in current May; cTN7: 当年7月最低温 Mean minimum temperature in current July; 非标准化系数 *B* 为岭回归方程中解释变量对应的系数, 标准化系数 Beta 绝对值越大, 则解释变量贡献越大; * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

3 讨论

海拔高度、坡向坡位和地形形态等微观地形因素会导致山地形成复杂的微气候, 由于地形引起的水热分配不一致, 不同生境下气候对树木径向生长的影响具有多样性^[8,31]。Zhirnova 等^[32]指出, 在山地生态系统中, 海拔和坡度等地形因子对微气候和树木径向生长的实际影响取决于可利用的水分。本文中, 祁连圆柏年轮宽度指数与年气候因子的相关分析结果表明, 3 个样点祁连圆柏径向生长均受年降水量的限制。祁连圆柏年轮宽度指数与月气候因子的相关分析和回归分析结果表明, 5 月和 6 月的降水对祁连圆柏径向生长贡献最大, 这不仅是本文研究区内祁连圆柏径向生长对降水响应的普遍现象, 与周边区域的祁连圆柏径向生长对降水的响应也具有较好的一致性^[5,21,33-39]。据此, 推测由于该地区气候干旱, 树木径向生长受降水的限制明显, 尽管不同采样点的海拔和坡度存在差异, 祁连圆柏径向生长对降水的响应在空间上仍具有较高的相似性。

本研究中祁连圆柏径向生长对温度的响应随生境不同表现出较为多样化的特征。整体而言, 关于祁连圆柏径向生长对温度的响应的研究十分丰富^[12, 22, 40-42]。然而, 有关降水因子和温度因子相对贡献的研究报道

并不多见。岭回归分析结果表明,温度因子的贡献普遍低于降水因子的贡献,且在不同生境中影响祁连圆柏径向生长的温度因子不尽相同。

从岭回归分析中标准化后的变量系数看,在 S1 样点的生境中,5 月和 6 月的温度对祁连圆柏径向生长具有负向影响,其中月平均最高温的贡献大于月平均温度;推测在高温的影响下,S1 表层土壤物理蒸散大,树木的蒸腾作用加强,使得祁连圆柏径向生长受到抑制^[43-44]。彭剑锋等^[6]在阿尼玛卿山也得出了相似的规律,即森林下限受生长季前期高温的胁迫作用,这支持了对样点 S1 气候限制的推断。在 S3 样点中,只有 6 月平均最高温表现出负向影响,推断可能是因该生境海拔偏高,5 月温度仍然偏低,对树木蒸腾以及生境蒸发失水过程影响不强所致。

在 S2 样点的生境中,温度因子均为正向影响,其中 9 月平均最高温贡献率相对较高,与 6 月降水贡献份额基本相同;除此之外,一些月份的平均最低温贡献也均为正值。这个结果显示,S2 样点生境中的祁连圆柏径向生长不仅仅受到降水较少的限制,可能同时还受到了低温的限制作用。进一步分析 S2 所处的地形位置可以看出,这里不仅坡度平缓,而且处于坡面向坡脚转折处的凹形坡的位置。与 S1 和 S3 坡地陡峭的生境相比,与地形部位相关的局部汇水效应,可能是导致降水对其径向生长的影响相对较弱的原因。在保证坡度或海拔相似的前提下,本文 3 个采样点与德令哈周边 5 个点的树轮宽度指数与气候因子的相关性(1957—2001 年)对比结果表明(表 4、图 4),相对于其他样点,5 月和 6 月的降水对 S2 样点的祁连圆柏径向生长的限制性影响不显著,证明了该样地地形有利于水分蓄积,而 S2 这种位于下坡位的凹形坡地形也是随着山风流入山谷的冷空气容易聚集的生境,因此低温对祁连圆柏径向生长的影响在 S2 生境中表现得较为明显。而祁连圆柏径向生长对 9 月份,即生长季末的月平均最高温表现出正响应(表 3),同样也证实了 S2 生境中温度不足,构成了祁连圆柏径向生长的限制因素。通过分析海拔和坡度相似的 S2 和 DLH2 生境(图 4),非凹形坡地形的 DLH2 的祁连圆柏径向生长对低温响应不显著进一步支持了我们对 S2 生境因为坡形形成与其他样地不同的微气候的推断。

表 4 本研究 3 个采样点(S1、S2、S3)与德令哈周边五个采样点(DLH2—6)信息

Table 4 Information for three sampling sites in this study (S1, S2, S3) and five sampling sites around Delingha (DLH2—6)

| | 样点 Site | 海拔 Elevation/m | 坡度 Slope/(°) | 纬度 Latitude/(°N) | 经度 Longitude/(°E) | 坡向 Aspect |
|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|
| 坡度相似 | S1 | 3520—3600 | 33 | 37.48 | 97.35 | 南 |
| Similar slope | DLH5 ^[45] | 3700 | 31 | 37.45 | 97.79 | 南 |
| | DLH6 ^[45] | 3780 | 30 | 37.51 | 97.06 | 南 |
| | S3 | 3900—3950 | 45 | 37.49 | 97.32 | 东南 |
| 海拔相似 | DLH4 ^[45] | 3800 | 13 | 37.44 | 98.06 | 南 |
| Similar elevation | S2 | 3750—3866 | 20 | 37.49 | 97.40 | 西南 |
| | DLH2 ^[45] | 3780 | 22 | 37.47 | 97.23 | 西南 |
| | DLH6 ^[45] | 3780 | 30 | 37.51 | 97.06 | 南 |
| | DLH3 ^[45] | 3920 | 20 | 37.45 | 97.54 | 西南 |
| | S3 | 3900—3950 | 45 | 37.49 | 97.32 | 东南 |

4 结论

德令哈地区柏树山地处内陆干旱区域,由于本研究中的样本均来自于阳坡生境,不同生境的祁连圆柏径向生长均受降水的限制,且 5 月的降水对祁连圆柏径向生长最为重要。在不同生境中,降水对地势较低的生境的祁连圆柏径向生长贡献最大,低温对分布在海拔 3900 m 的祁连圆柏径向生长贡献不明显,低温的贡献作用仅出现在地形部位有利于集水和冷空气聚集的生境中,如本研究中的 S2 生境。据此,本研究可为研究祁连圆柏径向生长对不同气候因子的响应的生境选取提供科学依据。同时本文也推测,分布在北坡生境中的祁连

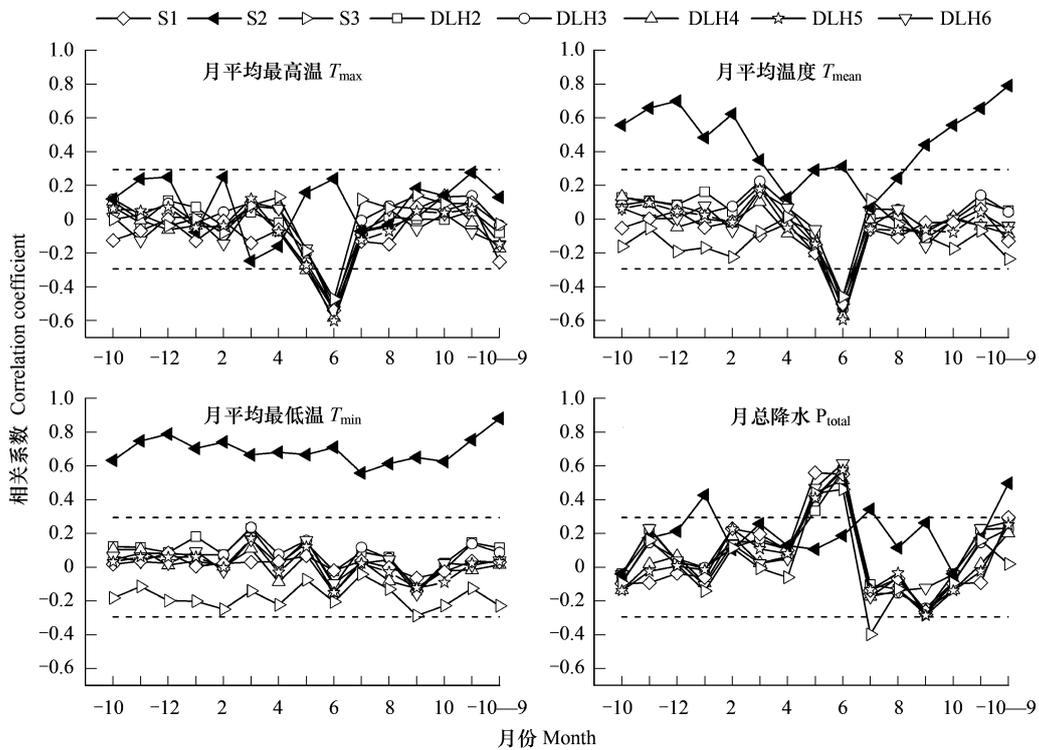


图 4 本研究 3 个采样点 (S1、S2、S3) 与德令哈周边 5 个采样点 (DLH2—6) 的树木年轮宽度指数与月气候因子 (T_{max} 、 T_{mean} 、 T_{min} 和 P_{total}) 之间相关性的对比 (1957—2001)

Fig.4 The comparison between three sampling sites in this study (S1, S2, S3) and five sampling sites around Delingha (DLH2—6) of the correlations between ring-width indices and monthly climate factors (T_{max} , T_{mean} , T_{min} and P_{total}) (1957—2001)

圆柏的径向生长,在受到降水不足的可能限制外,也会受到低温的限制,因此有待进一步研究该地区不同坡向生境的祁连圆柏径向生长的气候限制是否具有差异性。

参考文献 (References):

[1] Zhang W T, Jiang Y, Dong M Y, Kang M Y, Yang H C. Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 142-149.

[2] Yin Z Y, Li M Q, Zhang Y, Shao X M. Growth-climate relationships along an elevation gradient on a southeast-facing mountain slope in the semi-arid eastern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 2016, 30(4): 1095-1109.

[3] Liang E Y, Shao X M, Eckstein D, Huang L, Liu X H. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(2/3): 268-277.

[4] Yang B, Qin C, Huang K, Fan Z X, Liu J J. Spatial and temporal patterns of variations in tree growth over the northeastern Tibetan Plateau during the period AD 1450-2001. *The Holocene*, 2010, 20(8): 1235-1245.

[5] Liu L S, Shao X M, Liang E Y. Climate signals from tree ring chronologies of the upper and lower Treelines in the Dulan region of the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(3): 278-285.

[6] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 方克艳, 张芬. 坡向对海拔梯度上祁连圆柏树木生长的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 517-525.

[7] 王波, 陈拓, 徐国保, 刘晓宏, 王文志, 吴国菊. 祁连山中部祁连圆柏林线树木生长与积雪响应关系研究. *冰川冻土*, 2015, 37(2): 318-326.

[8] Gao L L, Gou X H, Deng Y, Yang M X, Zhang F. Assessing the influences of tree species, elevation and climate on tree-ring growth in the Qilian Mountains of northwest China. *Trees*, 2017, 31(2): 393-404.

[9] 詹思敏, 王可逸, 张凌楠, 冉依林, 刘晓宏. 祁连山东部不同树种径向生长对气候因子的响应. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2007-2014.

[10] 于健, 徐倩倩, 刘文慧, 罗春旺, 杨君珑, 李俊清, 刘琪璟. 长白山东坡不同海拔白落叶松径向生长对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(1): 24-35.

- [11] Liu B, Wang Y, Zhu H, Liang E, Camarero J J. Topography and age mediate the growth responses of Smith fir to climate warming in the southeastern Tibetan Plateau. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(10): 1577-1587.
- [12] 郑永宏, 朱海峰, 张永香, 邵雪梅. 柴达木盆地东缘山地祁连圆柏林上限树木径向生长与气候要素的关系. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 507-512.
- [13] Liu J, Zhang T J, Wu Q B, Jiang G L. Recent climate changes in the northwestern Qaidam Basin inferred from geothermal gradients. *Earth Science Informatics*, 2020, 13(2): 261-270.
- [14] Zhang H, Shao X M, Zhang Y. Which climatic factors limit radial growth of Qilian juniper at the upper treeline on the northeastern Tibetan Plateau? *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(10): 1173-1182.
- [15] Yang B, He M H, Shishov V, Tychkov I, Vaganov E, Rossi S, Ljungqvist F C, Bräuning A, Grießinger J. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(27): 6966-6971.
- [16] Liu W H, Gou X H, Li J B, Huo Y X, Yang M X, Zhang J Z, Zhang W G, Yin D C. Temperature signals complicate tree-ring precipitation reconstructions on the northeastern Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2021, 200: 103460.
- [17] Yang B, Qin C, Bräuning A, Osborn T J, Trouet V, Ljungqvist F C, Esper J, Schneider L, Grießinger J, Büntgen U, Rossi S, Dong G H, Yan M, Ning L, Wang J L, Wang X F, Wang S M, Luterbacher J, Cook E R, Stenseth N C. Long-term Decrease in Asian Monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6,700 Years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(30): E2102007118.
- [18] 郑景云, 邵雪梅, 郝志新, 葛全胜. 过去 2000 年中国气候变化研究. *地理研究*, 2010, 29(9): 1561-1570.
- [19] 张永香, 邵雪梅, 徐岩, Wilmking M. 利用生理模型模拟的柴达木东北缘祁连圆柏对气候要素的响应过程. *科学通报*, 2011, 56(12): 971-978.
- [20] 郑永宏, 贺红, 李德龙, 程星会, 张雨叶, 祝玲, 胡勇. 祁连圆柏径向生长对气候要素响应的再分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11): 180-184.
- [21] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 邵雪梅, 喻树龙, 陈峰, 张同文, 尚华明, 范子昂. 不同生境和去趋势方法下的祁连圆柏径向生长对气候的响应. *生态学报*, 2013, 33(24): 7827-7837.
- [22] Wang W Z, Liu X H, Shao X M, Qin D H, Xu G B, Wang B, Zeng X M, Wu G J, Zhang X W. Differential response of Qilian juniper radial growth to climate variations in the middle of Qilian Mountains and the northeastern Qaidam Basin. *Climatic Change*, 2015, 133(2): 237-251.
- [23] 郑永宏, 梁梁源, 朱海峰, 邵雪梅. 不同生境祁连圆柏径向生长对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 2008, 30(3): 7-12.
- [24] Qin C, Yang B, Bräuning A, Sonechkin D M, Huang K. Regional extreme climate events on the northeastern Tibetan Plateau since AD 1450 inferred from tree rings. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(3/4): 143-154.
- [25] das Neves Brandes A, Albuquerque R P, Lisi C S, de Lemos D N, Nicola L R M, Melo A L F, Barros C F. The growth responses of *Araucaria angustifolia* to climate are adjusted both spatially and temporally at its northern distribution limit. *Forest Ecology and Management*, 2021, 487: 119024.
- [26] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [27] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-95.
- [28] Cook E R. *A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization*. Tucson: University of Arizona, 1985.
- [29] Hoerl A E, Kennard R W. Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. *Technometrics*, 1970, 12(1): 69-82.
- [30] Lakshmi H B, Gallo M, Srinivasan R M. Comparison of regression models under multi-collinearity. *Electronic Journal of Applied Statistical Analysis*, 2018, 11(1): 340-368.
- [31] 苏宏新, 桑卫国. 山地小气候模拟研究进展. *植物生态学报*, 2002, 26(S1): 107-114.
- [32] Zhirmova D F, Belokopytova L V, Barabantsova A E, Babushkina E A, Vaganov E A. What prevails in climatic response of *Pinus sylvestris* in-between its range limits in mountains: slope aspect or elevation? *International Journal of Biometeorology*, 2020, 64(3): 333-344.
- [33] Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, Kang X C, Huang J G. A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739.
- [34] Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, Heussner K U, Wagner M, Österle H, Thompson L G. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China. *Climate Dynamics*, 2004, 23(7/8): 869-881.
- [35] Huang J G, Zhang Q B. Tree rings and climate for the last 680 years in Wulan area of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 369-377.
- [36] Zhang Q B, Qiu H Y. A millennium-long tree-ring chronology of *Sabina przewalskii* on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2007, 24(2/3): 91-95.

- [37] Peng J F, Gou X H, Chen F H, Li J B, Liu P X, Zhang Y. Altitudinal variability of climate-tree growth relationships along a consistent slope of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 87-96.
- [38] Qin C, Yang B, Melvin T M, Fan Z X, Zhao Y, Briffa K R. Radial Growth of Qilian Juniper on the Northeast Tibetan Plateau and potential climate associations. *PLoS One*, 2013, 8(11): e79362.
- [39] Yang B, He M H, Melvin T M, Zhao Y, Briffa K R. Climate control on tree growth at the upper and Lower Treelines: a case study in the Qilian mountains, Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2013, 8(7): e69065.
- [40] Shao X M, Huang L, Liu H B, Liang E Y, Fang X Q, Wang L L. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2005, 48(7): 939-949.
- [41] 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.
- [42] Wang W Z, McDowell N G, Liu X H, Xu G B, Wu G J, Zeng X M, Wang G X. Contrasting growth responses of Qilian juniper (*Sabina przewalskii*) and Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) to CO₂ fertilization despite common water-use efficiency increases at the northeastern Qinghai-Tibetan plateau. *Tree Physiology*, 2021, 41(6): 992-1003.
- [43] 蔡秋芳, 刘禹. 湖北麻城马尾松树轮宽度对气候的响应及 1879 年以来 6—9 月平均最高气温重建. *科学通报*, 2013, 58(SI): 169-177.
- [44] Cai Q F, Liu Y, Lei Y, Bao G, Sun B. Reconstruction of the March-August PDSI since 1703 AD based on tree rings of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) in the Lingkong Mountain, Southeast Chinese loess Plateau. *Climate of the Past*, 2014, 10(2): 509-521.
- [45] Xu Y, Shao X M. A 3585-year ring-width dating chronology of Qilian juniper from the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *IAWA Journal*, 2009, 30: 379-394.