

DOI: 10.5846/stxb201807131522

石松林, 靳甜甜, 刘国华, 王东波, 王景升, 李魁. 气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长. 生态学报, 2018, 38(24): - .

Shi S L, Jin T T, Liu G H, Wang D B, Wang J S, Li K. Climate warming decelerates growth of *Sabina tibetica* in the Lhasa River area of Tibet. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长

石松林^{1,2}, 靳甜甜³, 刘国华^{2,4,*}, 王东波⁵, 王景升⁶, 李 魁⁷

1 成都理工大学 旅游与城乡规划学院, 成都 610059

2 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国水利水电科学研究院 水电可持续发展研究中心, 北京 100038

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

5 呼伦贝尔市环境监测中心站, 呼伦贝尔 021008

6 中国科学院地理科学与资源研究所 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

7 呼伦贝尔市生态环境监测站, 呼伦贝尔 021008

摘要: 西藏拉萨河作为雅鲁藏布江最大的支流, 近几十年气温已显著上升, 将可能从不同的程度上影响流域内植被的生长动态。以拉萨河流域主要分布的树种——大果圆柏(*Sabina tibetica*)为研究对象, 采用树木年轮学的方法对大果圆柏进行了年轮采样和处理, 建立了树木年表, 探讨了大果圆柏过去的生长动态特征, 并用相关分析、偏相关分析和滑动相关分析的方法分析了不同气候因子与树木年轮宽度指数的关系。研究表明, 大果圆柏树木年轮宽度指数与前一年 6—10 月和当年 3—7 月的降水、相对湿度和帕默尔干旱指数(PDSI)呈显著的正相关关系, 而与前一年 6—9 月和当年 3—8 月的平均温度和平均最高温度以及当年 5—7 月的平均最低温度均呈显著的负相关关系, 表明了气候变暖引起的干旱胁迫是导致近几十年来大果圆柏树木径向生长下降的主要原因。在未来气候变暖背景下, 拉萨河大果圆柏林将可能出现生长下降, 甚至死亡的现象, 将潜在驱动区域森林减少。

关键词: 树木年轮; 气候变化; 大果圆柏; 树木生长; 拉萨河

Climate warming decelerates growth of *Sabina tibetica* in the Lhasa River area of Tibet

SHI Songlin^{1,2}, JIN Tiantian³, LIU Guohua^{2,4,*}, WANG Dongbo⁵, WANG Jingsheng⁶, LI Kui⁷

1 College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Research Center for Sustainable Hydropower Development, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

5 Environmental monitoring center of Inner Mongolia, Hulunbeir 021008, China

6 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

7 Ecological environment monitoring station of Inner Mongolia, Hulunbeir 021008, China

Abstract: Lhasa River, situated in the Tibetan Plateau, is the largest tributary of the Yarlung Zangbo River. This region has experienced high warming rates in recent decades, which could have an effect on vegetation growth dynamics. Here, we

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502102); 西藏自治区科技支撑项目(Z2016C01G01/08)

收稿日期: 2018-07-13; **修订日期:** 2018-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ghliu@rcees.ac.cn

used dendroclimatological techniques to sample and dispose tree cores of *Sabina tibetica* in the Lhasa River area of Tibet and built standard ring-width index chronology. We assessed the dynamics of tree growth of *Sabina tibetica* over the past decades, and conducted correlations, partial correlations and moving correlation analysis to analyze the relationship between tree ring-width index chronology and climatic factors. Our results indicated that ring-width index (RWI) had strong positive correlations with total precipitation, relative humidity and Palmer Drought Severity Index (PDSI) from June to October of the previous year and from March to July during the current year's growing season, but significant negative associations with mean temperature and mean maximum temperature from June to September of the previous year and from March to August in the current year, and mean minimum temperature from May to July in the current year. Furthermore, drought because of climate warming had primary influence on tree growth decline in recent decades. If climate warming continues in the Lhasa River area, further tree growth decline and increases in tree mortality may occur, potentially driving regional forest loss.

Key Words: tree ring; climate change; *Sabina tibetica*; tree growth; Lhasa River

气候变化已经从局地、区域和全球等不同的时空尺度上深刻影响着树木的生长^[1-4], 树木生长动态变化引起了学者的广泛关注。最近的研究结果揭示了气候变暖将会促进部分区域树木的生长^[5-6], 也将显著降低部分区域树木的生长^[1,3,7]。因此, 气候变化对不同区域树木生长的影响仍然存在着很大的不确定性, 需要准确评估不同种类树木生长对气候变化的响应, 才能预测未来气候变化情景下森林的变化趋势。

树木年轮宽度作为树木生长的敏感指标, 已经被广泛应用于树木生长对气候变化的响应研究^[8-10]。最近的研究结果表明了在树木生长受到低温限制的区域, 如高山林线, 气候变暖引起的温度升高将加速树木的生长^[5-6,11-12]。如在我国西北部天山地区, 气候变暖已显著加速了高山树线交错区的雪岭云杉林 (*Picea schrenkiana*) 树木径向生长^[5]。然而, 在水分可利用性受限制的区域, 如干旱和半干旱区, 温度升高将会减低土壤水分, 增加干旱胁迫, 进而将抑制树木的生长, 甚至导致死亡^[3,4,7]。如气候变暖引起的干旱胁迫已经导致亚洲内陆的半干旱区森林生长下降^[3]。因此, 气候变暖对森林生长的影响存在着明显的区域性, 需要开展不同地区的森林生长对气候变化的响应研究。

青藏高原作为地球上海拔最高的高原, 是全球气候变化响应最为敏感的地区之一, 在过去几十年里, 经历了明显的变暖趋势^[13-15]。基于树木年轮气候学的研究已经揭示了青藏高原的森林生长对气候变化响应敏感^[16-18]。西藏拉萨河作为雅鲁藏布江最大的支流, 近 33 年来年均气温已升高 1.9℃ 左右^[19], 这将可能在不同的程度上影响流域内植被的生长动态。大果圆柏林 (*Sabina tibetica*) 为拉萨河流域主要的森林类型之一, 主要分布在河谷阶地或山坡 (图 1)。近年来, 对拉萨河流域的研究多集中于气候变化、径流变化及土地利用等方面, 而有关气候变化对流域内树木的生长动态影响的研究却鲜有报道。本文将以拉萨河大果圆柏为研究对象, 采用树木年轮气候学的方法系统分析其生长动态变化, 并探讨近几十年来气候变化对其生长动态的影响, 以期预测未来气候变化对拉萨河流域森林生长的影响机制提供重要的科学基础。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

拉萨河流域是雅鲁藏布江中游最大的一级支流, 发源于念青唐古拉山中段南麓 (图 2), 主要依靠降水、积雪融水和地下水补给^[20]。研究区位于拉萨河中段 (图 2), 气候属于高原温带半干旱气候, 干湿季节分明, 年温差小, 日温差较大, 辐射强度大^[21]。依据当雄气象站资料, 该区域年均温为 1.89℃, 最冷月 1 月份的平均温度为 -8.99℃, 最暖月 7 月份的平均温度为 11.11℃; 年降雨量为 474.44 mm, 主要集中于 6—9 月, 占全年降水量的 84% (图 3)。在拉萨河中上游区域以高山灌丛、草甸及垫状植被为主, 而仅在下游地区有森林植被分布。但是, 下游的阳坡环境较为干燥、贫瘠, 极大地限制了喜湿森林的分布, 而大果圆柏具有较强的耐土壤贫瘠能



图1 西藏拉萨河流域大果圆柏景观

Fig.1 Landscape with *Sabina tibetica* forest in the Lhasa River

力,能够适应这样的环境条件而形成稳定的植物群落,主要分布在当雄县与林周县之间的区域。整个区域土壤类型以山地灌丛草原土、高山草甸土及亚高山草甸土为主^[22]。

1.2 年轮样品采集、处理与年表建立

2016年9月在拉萨河下游河谷地带设置大果圆柏年轮采集样点 30°17.232'N, 91°08.433'E, 海拔 4154 m, 选取 15 棵大果圆柏, 用生长锥在每棵树胸高位置(距地面 1.3 m 处)采集 2 根树芯, 即沿与山坡平行方向和与山坡垂直方向分别采集一根树芯, 共钻取 30 根树芯, 装入塑料管中带回实验室。

在实验室内, 将野外采集的树芯用白乳胶固定在定制の木槽内, 自然风干后, 用不同粗细的砂纸(180 目、240 目、360 目、600 目、1000 目、1500 目和 2000 目)对树芯进行打磨, 直到年轮界线清晰可辨。利用树木年轮研究中的骨架图法对打磨好的年轮样品进行交叉定年, 用精度为 0.01m 的树木年轮测量仪(LINTAB, Rinntech, Germany)对年轮样品进行测量。进一步用 COFECHA 程序将测量结果进行检验, 除去质量较差的年轮样品, 最终保留 25 根树芯。用 R 语言中的 dplR 扩展包对每个年轮宽度序列进行去趋势(修正的负指数函数方法 Modified negative exponential curve)处理, 进而建立标准化年表。

年表统计结果表明, 树间相关系数(Mean correlations Between trees, Rbar)、一阶自相关系数(First-order autocorrelation, ACI)、平均敏感度(Mean sensitivity, MS)和信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)分别为 0.257、0.39、0.21 和 5.53。同时, 在 1877 年后, 年表的样本群体表达信号(expressed population signal, EPS)均超过 0.85, 表明了本次调查采集的年轮样本量能够代表总体特征。

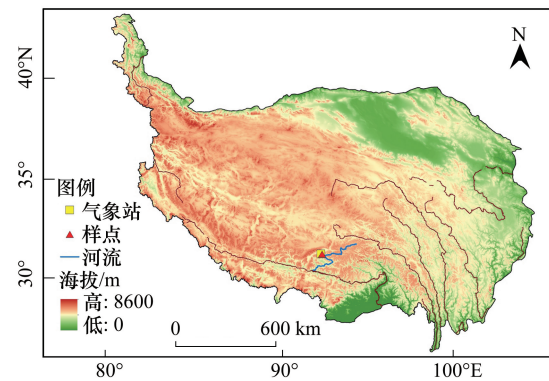


图2 研究区位置

Fig.2 Location of study area in the Tibetan Plateau

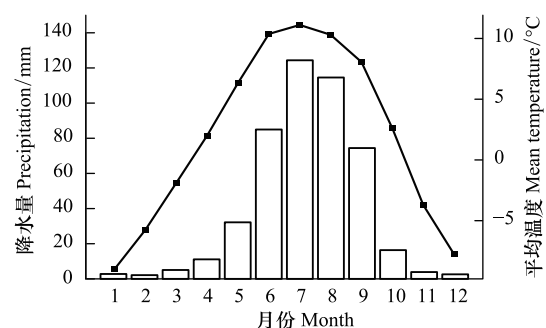


图3 1963—2016 年当雄气象站的月平均温度(折线)和月降水量(柱状)

Fig.3 Monthly mean temperature (broken line) and precipitation (bars) at the Dangxiong meteorological station from 1963 to 2016

1.3 气象数据的获取

从距离采样点最近(直线距离约为 9 km)的当雄气象站获取自建站以来的月平均温度、月平均最低温度、月平均最高温度、月平均相对湿度和月降雨量(1963—2016 年)。鉴于树木生长对气候变化有一定的滞后性,本文选取了从前一年 6 月至当年 9 月的气象因子。由于该区域降水较少,为了更好地反映树木生长与水分的关系,从 KNMI Climate Explorer(<http://climexp.knmi.nl/>)选择离采样点最近的栅格点(91—91.5°E, 30—30.5°N)下载帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)。此外,为揭示河流径流对树木生长的影响,从蔺学东^[21]获取 1956—2003 年的年径流量数据。

1.4 数据处理与分析

为了识别该区域气候变化的趋势,用线性回归方法来分析 1963—2016 年以来各气象因子的年际变化趋势。为了揭示大果圆柏树木生长动态变化,用线性回归方法来分析其年轮宽度指数的年际变化趋势。与此同时,为了揭示大果圆柏树木径向生长与气候变化的关系,用 R 语言中的 treeclim 包^[23]对年轮宽度指数与气象因子之间的关系进行相关分析和滑动相关分析。用 Pearson 相关分析方法分析了 1956—2003 年树木年轮宽度指数(RWI)与拉萨河年径流量的关系。

所有的分析与作图均用 R 语言(R 3.5.0)完成。

2 结果与分析

2.1 区域气候变化特征

该区域 1963—2016 年期间的温度、降水、相对湿度和帕默尔干旱指数的年际变化趋势如图 4 所示。自 1963 年以来,年平均最低温度和年平均温度均呈现出显著上升的趋势($P < 0.01$),增温速率分别为 0.442 和 0.375°C/10a(图 4);而年平均最高温度从 1990s 才开始出现显著上升的趋势($P < 0.01$)其增温速率达到 0.963°C/10a(图 4)。年降水量和年平均相对湿度无显著的变化趋势($P > 0.05$),然而近年来表现出较为明显的下降趋势(图 4)。帕默尔干旱指数(PDSI)的年际变化趋势也不显著($P > 0.05$),然而许多年份的 PDSI 值均小于 -0.5,甚至部分年份的 PDSI 值小于 -2(图 4),表明了该区域受到了不同程度的干旱。

2.2 树木生长动态特征

通过对大果圆柏生长动态进行分析(图 5),发现在 1914—1971 年期间,年轮指数呈现出快速上升的生长趋势($P < 0.01$);然而在 1971 年之后却表现出明显下降的趋势($P = 0.016$),说明了近几十年以来大果圆柏的生长出现了迅速下降的趋势。

2.3 树木生长与气候的关系

通过对大果圆柏的年轮宽度指数与气候因子进行相关性分析,发现与当年 3—9 月的平均温度、当年 3—8 月的平均最高温度和当年 5—7 月的平均最低温度均呈现出显著的负相关关系($P < 0.01$,图 6),这表明了当年生长季温度升高会对树木的生长产生不利影响。同时,年轮宽度指数还与前一年 6—10 月的平均最高温度和前一年 6—9 月平均温度也呈现出显著的负相关关系($P < 0.01$,图 6),这表明了前一年的温度升高也会对树木生长产生消极影响。对大果圆柏的年轮宽度指数与降水量进行相关性分析,发现与当年 3—7 月和前一年 6—10 月的降水量均呈现显著的正相关关系($P < 0.01$,图 6),表明了大果圆柏的树木生长会受到降水的强烈影响。同时,大果圆柏的年轮宽度指数与当年 3—8 月和前一年 6—10 月的相对湿度均表现出显著的正相关关系($P < 0.01$,图 6),说明了湿度对大果圆柏树木生长起着重要作用。大果圆柏的年轮宽度指数与前一年 7 月到当年 7 月的 PDSI 均呈现出显著的正相关关系($P < 0.01$,图 6),表明了该区域大果圆柏的树木生长也会受到水分的强烈限制作用。

用响应函数对大果圆柏的年轮宽度指数与温度、降水的关系进行分析,表明 5、6 月降水和温度对树木的影响最为显著,其中 5、6 月的降水对树木的径向生长具有明显的促进作用,而 5、6 月的平均最高温度对树木的径向生长具有显著的抑制作用(图 7)。为了去除降水与平均最高温度之间的相互作用对大果圆柏树木生

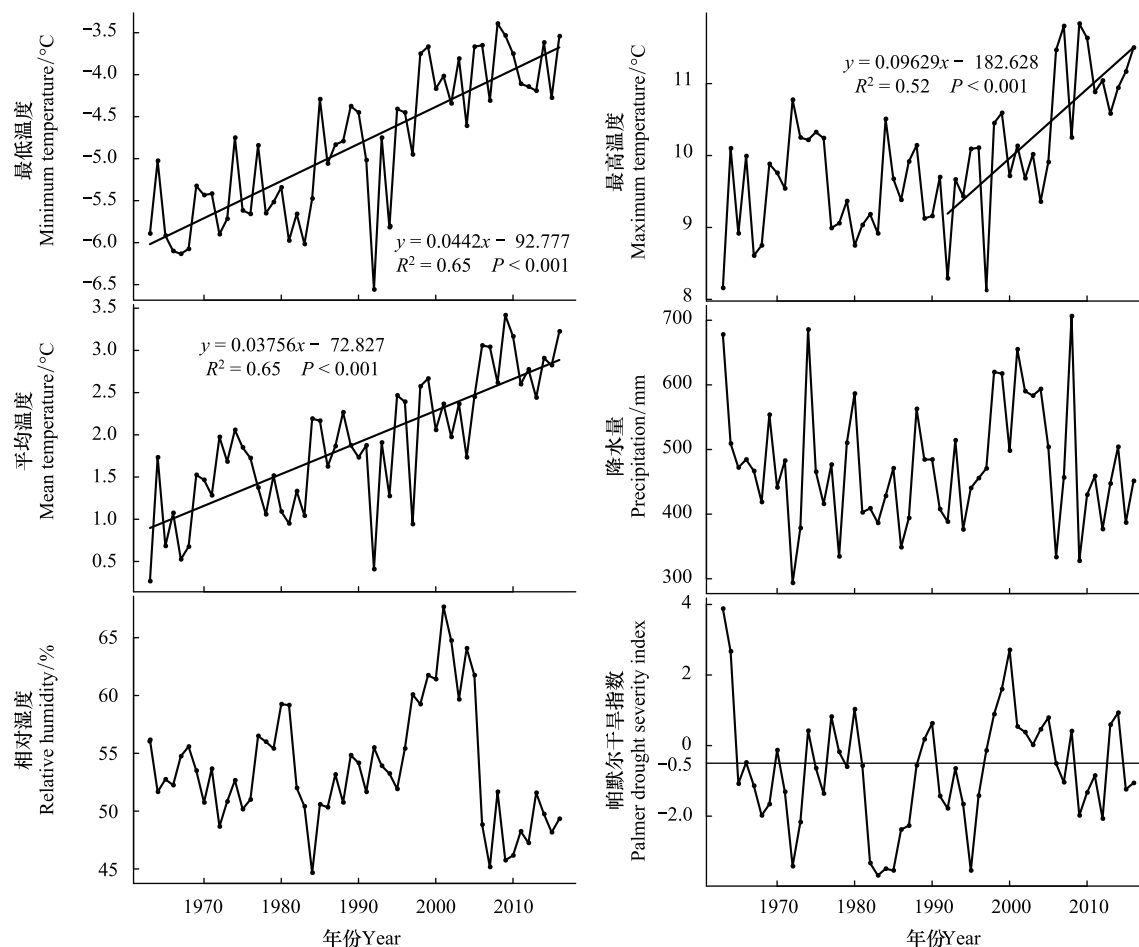


图4 拉萨河流域年平均温度、最低温度、最高温度、总降水量、相对湿度和帕默尔干旱指数的变化趋势

Fig.4 Trends of the annual minimum temperature, maximum temperature, mean temperature, total precipitation, relative humidity and Palmer Drought Severity Index in the Lhasa River

长与气候关系的影响,采用偏相关分析。偏相关分析结果表明,在控制5、6月平均最高温度的影响时,大果圆柏的年轮宽度指数与5、6月降水量偏相关系数分别为0.32($P < 0.05$)和0.08($P > 0.05$);而控制5、6月的降水量的影响时,年轮宽度指数与5、6月平均最高温度偏相关系数分别为-0.45($P < 0.001$)和-0.53($P < 0.001$),与5—6月平均最高温度偏相关系数达到了-0.56($P < 0.001$),说明了相对于降水量来说,5、6月的平均最高温度对大果圆柏的径向生长起着主导作用。

为揭示大果圆柏树木生长对气候响应的时间稳定性,对大果圆柏的年轮宽度指数与气候因子进行了滑动相关分析,结果表明在1964—2016年期间,其生长对5—6月平均温度和最高温度的响应关系(显著负相关)随时间呈现出显著增强的趋势($P < 0.01$,图8),这表明了温度对大果圆柏树木生长的抑制作用在逐渐增强;而对当年5—6月降水和PDSI的响应关系(显著正相关)随时间也呈现出显著增强的趋势($P < 0.01$,图8),这表明了水分对大果圆柏树木生长的作用在逐渐增强。

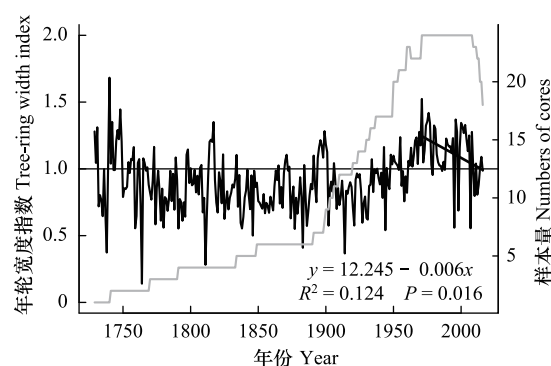


图5 拉萨河流域大果圆柏树轮年表

Fig.5 Tree-ring width chronologies of *Sabina tibetica* in the Lhasa River

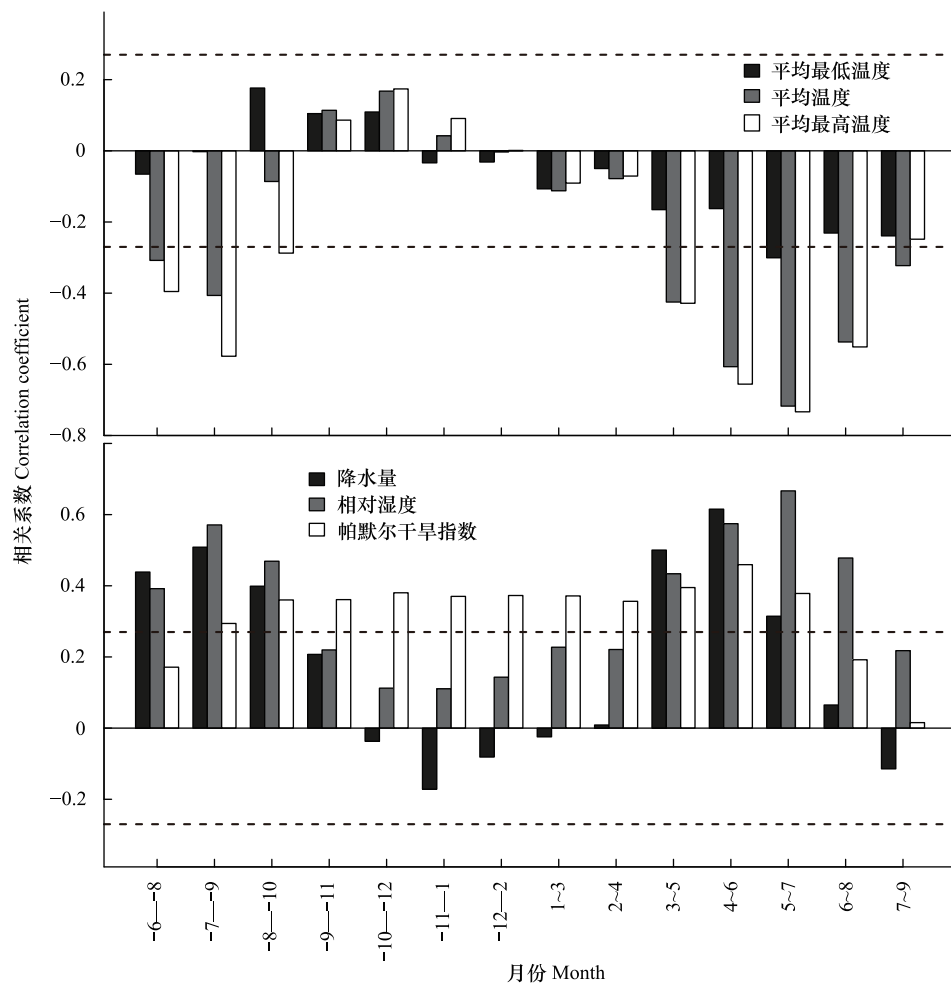


图6 大果圆柏年轮宽度指数与3个月(季节)尺度的平均温度、平均最低温度、平均最高温度、总降水量、相对湿度和帕默尔干旱指数的相关关系(1963—2016年)

Fig.6 Correlation coefficients of *Sabina tibetica* chronologies between mean minimum temperature, mean maximum temperature, mean temperature, total precipitation, relative humidity and PDSI from 1963 to 2016

Tmn: 平均最低温度, Mean minimum temperature; Tm: 平均温度, Mean temperature; Tmx: 平均最高温度, Mean maximum temperature; Pre: 降水量, Precipitation; Hum: 相对湿度, Relative humidity; PDSI: 帕默尔干旱指数, Palmer Drought Severity Index

此外,大果圆柏的年轮宽度指数与拉萨河年径流量也呈现出显著的正相关关系($r=0.3, P=0.04$),说明了该流域河流径流也会大果圆柏的树木生长产生积极影响。

3 讨论

最近的研究结果表明了在一些水分受限制的区域,气候变暖引起的温度升高将会显著降低树木的生长^[3-4,7]。如基于树木年轮学的研究结果揭示了气候变暖已经导致了我国青藏高原东北缘的半干旱森林—青海云杉(*Picea crassifolia*)树木生长出现下降和死亡的现象^[7]。本研究结果表明了在青藏高原的西藏拉萨河下游,分布于干旱河谷的大果圆柏树木生长在1970s后呈现出明显的下降趋势,暗示了该区域的环境发生了显著变化。

基于树木年轮气候学的大量研究已经阐明了大果圆柏树木生长对气候变化响应敏感^[17,24-26]。例如在青藏高原东缘的类乌齐县(昌都地区),大果圆柏的径向生长与当年5、6月的温度(平均温度、最低温度和最高温度)呈显著的负相关,而与5月的降水量呈明显的正相关关系^[25];时兴合等^[27]在青藏高原东缘的杂多县(青海)的研究结果也表明了大果圆柏的径向生长也与5、6月的平均温度和平均最高温度均表现出强烈的负

相关关系,而与5月的降水量和相对湿度呈现出显著的正相关关系。在青藏高原南缘的南木县(日喀则市),大果圆柏的径向生长也与5—7月的平均温度和平均最高温度呈显著负相关,而与5—6月的降水量呈强烈负相关^[28]。同时,在青藏高原东北缘的索县和嘉黎县(昌都地区),大果圆柏的树木年轮宽度指数与5、6月的帕默尔干旱指数表现显著的正相关关系^[17];黄小梅等^[29]也发现青藏高原东北缘的治多县(青海)的大果圆柏树轮宽度指数与4—6月的帕默尔干旱指数呈现强烈的正相关关系。这些研究均揭示了温度 and 水分对大果圆柏的树木生长的强烈限制作用。在本研究中,大果圆柏树轮宽度指数与温度(平均温度、平均最低温度和平均最高温度)均表现出显著的负相关关系,而与降水、相对湿度和帕默尔干旱指数均呈现显著的正相关关系,与上述研究结果基本一致。

在本研究中,通过对大果圆柏树轮宽度指数与气候因子的关系进行相关分析、响应函数和偏相关分析,发现温度,特别是最高温度,是限制该区域大圆柏径向生长的最关键的气候因子。在一些水分受限制的区域,如干旱和半干旱地区,气候变暖将会通过增强蒸散作用减低土壤水分,甚至导致干旱胁迫,进而延长气孔关闭的时间和减少光合作用,从而降低树木的生长速率^[4]。最近基于树木年轮学的研究结果也表明了气候变暖引起的水分胁迫将会导致半干旱地区的树木生长下降,甚至死亡^[3,7]。在该区域,年均降水量仅有474.44 mm,为半干旱区;近几十年来温度呈现出显著升高的趋势,特别最高温度自1990s以来升温速率达到了0.963℃/10a,而降水量却表现出不明显的下降趋势,许多年份的PDSI值也低于-0.5,这说明了该区域温度的快速升高已经引起了干旱,进而引起树木生长下降。因此,近几十年来,气候变暖是导致拉萨河流域大果圆柏树木生长下降的主要原因。

前一年的气候状况也将在一定程度上影响树木生长^[8,30]。在本研究中,大果圆柏树轮年表展示了与前一年6—10月温度强烈的负相关关系,表明了前一年夏季和秋季温度升高也不利于次年树木的径向生长;而树轮年表与前一年6—10月的降水、相对湿度和PDSI均呈现显著的正相关,表明了前一年夏季和秋季的降水或相对湿度的增加将会促进次年树木的径向生长。在一些水分受到限制的区域,生长季前期的气候变暖将会增强蒸散作用减低水分可利用性,从而增加次年生长季发生干旱的频率和程度^[4,31],进而降低树木的生长或增加树木的死亡^[3,7],这可以在一定程度上解释大果圆柏径向生长与前一年气候状况呈强烈的相关关系。

最近基于径流重建的研究结果揭示了河流径流会对流域内树木的径向生长产生重要影响^[32-34]。如我国新疆阿尔泰山区域的新疆落叶松(*Larix sibirica*)和新疆云杉(*Picea obovata*)的树木年轮宽度指数与前一年7月至当年6月的哈巴河径流量均呈现显著的正相关关系^[33],揭示了河流径流量对该流域树木径向生长的影响。在本研究中,大果圆柏的年轮宽度指数与拉萨河年径流量也呈现出显著的正相关关系,表明了该区域河流径流量的增加有利于树木的径向生长。

4 结论

本文以西藏拉萨河大果圆柏为研究对象,采用树木年轮学的方法建立了树木年表,分析了大果圆柏过去的生长动态特征,并探讨了不同气候因子对树木径向生长的影响。研究结果表明,近几十年来,大果圆柏树木径向生长出现了显著下降的现象,气候变暖是导致其生长下降的主要原因。温度是影响该区域大果圆柏树木生长的最关键气候因子,气候变暖引起的温度升高将降低水分可利用性,从而限制大果圆柏树木的径向生长。

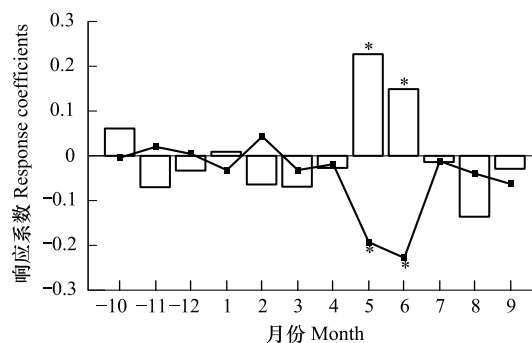


图7 大果圆柏年轮宽度指数与月平均最高温度(折线)和月降水量(柱状)的响应关系(1963—2016年)

Fig. 7 Response coefficients of *Sabina tibetica* chronologies between maximum temperature, mean month temperature and precipitation from 1963 to 2016

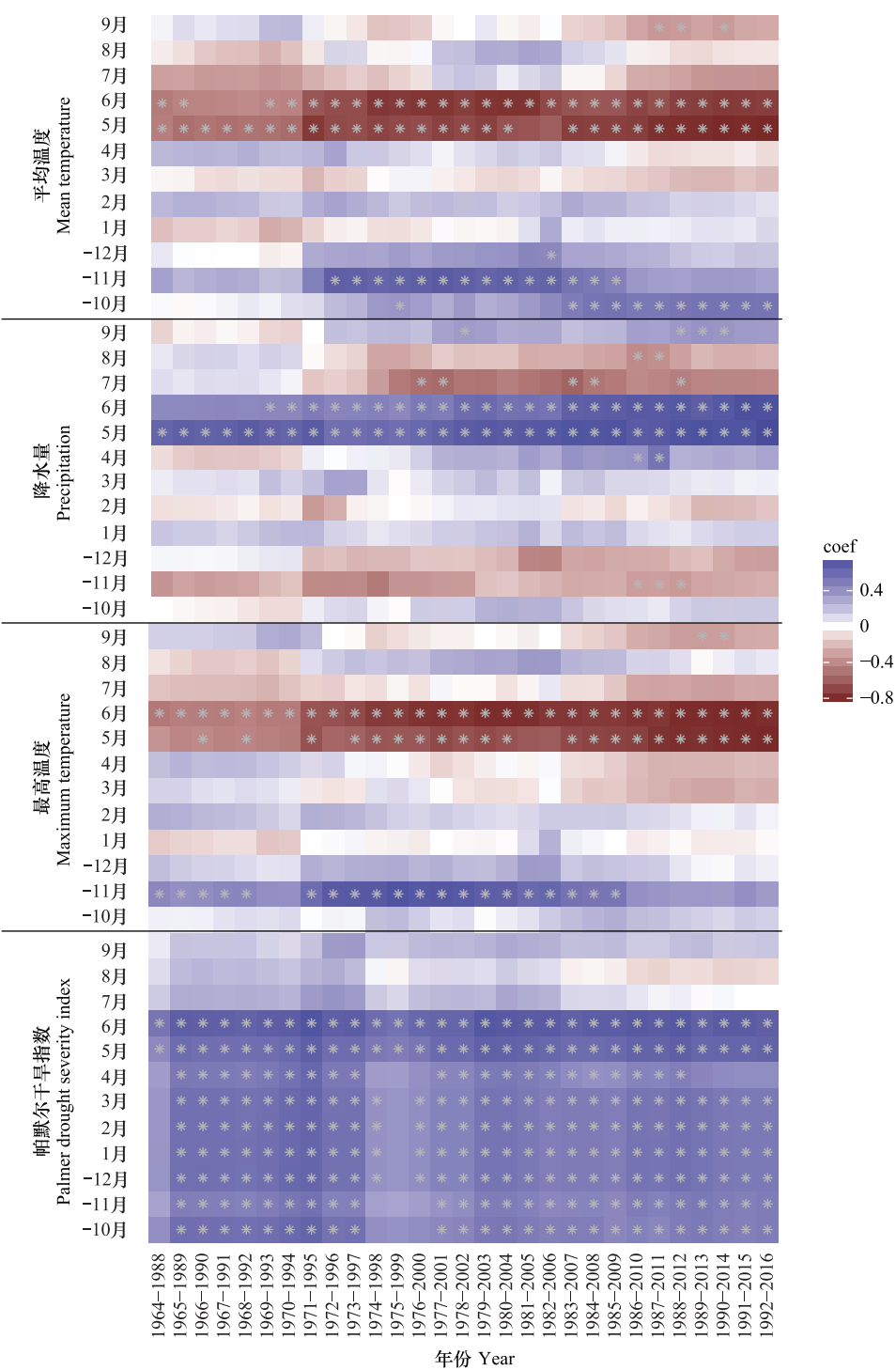


图8 大果圆柏年轮宽度指数与前一年10月至当年9月平均温度、最高温度、相对湿度和帕默尔干旱指数的滑动相关分析(25年)

Fig.8 The 25-year window moving correlations of *Sabina tibetica* chronologies between maximum temperature, mean temperature, relative humidity and Palmer Drought Severity Index

前一年和当年的气候状况都会对大果圆柏树木生长产生影响。因此,在未来气候变暖背景下,拉萨河大果圆柏林将可能出现生长下降,甚至死亡,进而对流域生态环境产生重要影响,需要进一步关注。

参考文献 (References):

[1] Girardin M P, Hogg E H, Bernier P Y, Kurz W A, Guo X J, Cyr G. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests

- intensify with the anticipated climate warming. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 627-643.
- [2] Charney N D, Babst F, Poulter B, Record S, Trouet V M, Frank D, Enquist B J, Evans M E K. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1119-1128.
- [3] Liu H Y, Williams A P, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [4] Park Williams A, Allen C D, Macalady A K, Griffin D, Woodhouse C A, Meko D M, Swetnam T W, Rauscher S A, Seager R, Grissino-Mayer H D, Dean J S, Cook E R, Gangadagamage C, Cai M, McDowell N G. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 292-297.
- [5] Qi Z H, Liu H Y, Wu X C, Hao Q. Climate-driven speedup of alpine treeline forest growth in the Tianshan Mountains, Northwestern China. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 816-826.
- [6] Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, Kipfmüller K F. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(48): 20348-20353.
- [7] Liang E, Leuschner C, Dulamsuren C, Wagner B, Hauck M. Global warming-related tree growth decline and mortality on the north-eastern Tibetan plateau. *Climatic Change*, 2016, 134(1/2): 163-176.
- [8] Scott George S, An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 132-150.
- [9] Wilmking M, Juday G P, Barber V A, Zald H S J. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1724-1736.
- [10] Borgaonkar H P, Sikder A B, Ram S. High altitude forest sensitivity to the recent warming: a tree-ring analysis of conifers from Western Himalaya, India. *Quaternary International*, 2011, 236(1/2): 158-166.
- [11] Panthi S, Bräuning A, Zhou Z K, Fan Z X. Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Dendrochronologia*, 2018, 47: 1-9.
- [12] Wang W Z, Jia M, Wang G X, Zhu W Z, McDowell N G. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher- and lower-elevations in the eastern Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2017, 402: 135-144.
- [13] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 1729-1742.
- [14] Yang K, Wu H, Qin J, Lin C G, Tang E J, Chen Y Y. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [15] Duan J P, Li L, Fang Y J. Seasonal spatial heterogeneity of warming rates on the Tibetan Plateau over the past 30 years. *Scientific reports*, 2015, 5: 11725.
- [16] Zhang Q B, Evans M N, Lyu L. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries. *Nature Communications*, 2015, 6: 8062.
- [17] Wang X C, Zhang Q B, Ma K P, Xiao S C. A tree-ring record of 500-year dry-wet changes in northern Tibet, China. *Holocene*, 2008, 18(4): 579-588.
- [18] Shi C M, Masson-Delmotte V, Daux V, Li Z S, Carré M, Moore J C. Unprecedented recent warming rate and temperature variability over the east Tibetan Plateau inferred from Alpine treeline dendrochronology. *Climate Dynamics*, 2015, 45(5/6): 1367-1380.
- [19] 张核真, 卓玛, 向飞, 卓嘎, 格桑. 1981-2013 年气候因子变化对西藏拉萨河径流的影响. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1304-1311.
- [20] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征. *地理学报*, 1999, 54(S1): 157-164.
- [21] 蔺学东, 张德铨, 姚治君, 巩同梁, 王宏, 刘林山. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析. *地理科学进展*, 2007, 26(3): 58-67.
- [22] 王建林. 雅鲁藏布江及其支流中部流域地区水文特性分析. *水土保持通报*, 1994, 14(2): 54-58.
- [23] Zang C, Biondi F. treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, 38(4): 431-436.
- [24] Li T, Li J B. A 564-year annual minimum temperature reconstruction for the east central Tibetan Plateau from tree rings. *Global and Planetary Change*, 2017, 157:165-173.
- [25] Zhu H F, Shao X M, Yin Z Y, Huang L. Early summer temperature reconstruction in the eastern Tibetan plateau since ad 1440 using tree-ring width of *Sabina tibetica*. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 106(1/2): 45-53.
- [26] Shi X H, Qin N S, Zhu H F, Shao X M, Wang Q C, Zhu X D. May-June mean maximum temperature change during 1360-2005 as reconstructed by tree rings of *Sabina tibetica* in Zaduo, Qinghai Province. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 3023-3029.
- [27] 时兴合, 秦宁生, 朱海峰, 邵雪梅, 汪青春, 朱西德. 青海杂多大果圆柏年轮指示的公元 1360~2005 年 5~6 月最高气温变化. *科学通报*, 2010, 55(19): 1924~1931.
- [28] Liu, J J, Qin C, Kang S Y. Growth response of *Sabina tibetica* to climate factors along an elevation gradient in south Tibet. *Dendrochronologia*,

- 2013, 31(4): 255-265.
- [29] 黄小梅,肖丁木,秦宁生. 大果圆柏(*Juniperus tibetica*)树轮记录的1606-2012年长江源区4-6月帕尔默干旱指数变化. 中国沙漠, 2017, 37(4): 784-792.
- [30] Gou X H, Chen F H, Jacoby G, Cook E, Yang M X, Peng H F, Zhang Y. Rapid tree growth with respect to the last 400 years in response to climate warming, northeastern Tibetan Plateau. International Journal of Climatology, 2007, 27(11): 1497-1503.
- [31] Pederson G T, Gray S T, Woodhouse C A, Betancourt J L, Fagre D B, Littell J S, Watson E, Luckman B H, Graumlich L J. The Unusual Nature of Recent Snowpack Declines in the North American Cordillera. Science, 2011, 333(6040): 332-335.
- [32] Gou X H, Chen F H, Cook E, Jacoby G, Yang M X, Li J B. Streamflow variations of the Yellow River over the past 593 years in western China reconstructed from tree rings. Water Resources Research, 2007, 43(6): W06434.
- [33] Zhang T W, Yuan Y J, Chen F, Yu S L, Zhang R B, Qin L, Jiang S X. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China. Journal of Arid Land, 2018, 10(1): 53-67.
- [34] Stagge J H, Rosenberg D E, DeRose R J, Rittenour T M. Monthly paleostreamflow reconstruction from annual tree-ring chronologies. Journal of Hydrology, 2018, 557: 791-804.