

色季拉山贡布红杉径向生长对气温及降水的分异响应

蔡 苗^{1,2,3,4}, 于德水^{1,2,3,4}, 卢 杰^{1,2,3,4*}

(1. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000;
3. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000;
4. 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘 要:受全球气候变暖的影响,高海拔地区出现了树木径向生长对气候变化的分异响应现象,但是当前西藏特有树种贡布红杉与气象因子之间的响应关系仍不确定。基于色季拉山贡布红杉树木样芯,探究贡布红杉径向生长与气候变化之间的响应联系,并分析影响贡布红杉径向生长的主要气候因子。利用 Mann-Kendall 突变检验、距平及累计距平确定气温的突变时间,结合 TASP-WIN 和 ARSTAN 程序,讨论贡布红杉径向生长在气温突变前后与平均气温、最高气温、最低气温、降水和湿度之间的响应联系。结果表明:1)在生长初期(2—4月)贡布红杉的径向生长与最高气温呈显著负相关,而在生长期(5—9月)其径向生长与相对湿度呈显著负相关。2)在气温发生突变后,贡布红杉径向生长与8月的平均气温由正相关转变为负相关,与9月的最低气温由负相关转变为正相关;3)在研究区域内贡布红杉径向生长的过程中对气候响应呈现分异,与外界环境之间存在的正相关关系或负相关关系可能会相互转变。当前研究区域内气温与贡布红杉径向生长之间的响应关系仍然显著,但降水及相对湿度与贡布红杉之间的响应关系明显增强;极端气温(最低气温和最高气温)对贡布红杉径向生长影响存在明显的分异。

关键词:贡布红杉;年轮气候学;树木年轮;气候波动;色季拉山

中图分类号:S791.266

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0117-08

Divergent Responses of Radial Growth of *Larix kongboensis* to Temperature and Precipitation in the Shergyla Mountain

CAI Miao^{1,2,3,4}, YU De-shui^{1,2,3,4}, LU Jie^{1,2,3,4*}

(1. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Tibet, China;
2. Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University/Ministry of Education, Nyingchi 860000, Tibet, China; 3. Nyingchi National Forest Ecosystem Observation & Research Station of Tibet, Nyingchi 860000, Tibet, China; 4. Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security in Tibet, Nyingchi 860000, Tibet, China)

Abstract: Due to the impact of global warming, the radial growth of trees in high-altitude areas has differentiated responses to climate change. However, the restrictive meteorological factors of the endemic tree species in Tibet are still uncertain. This study based on the tree-ring of *Larix kongboensis* in the Shergyla Mountain, the response relationship between radial growth and climate change was explored, and the main meteorological factors limiting radial growth of *L. kongboensis* were analyzed. Mann-Kendall test, anomaly, and cumulative anomaly were used to determine the time of abrupt change of temperature; combined with TASP-WIN and ARSTAN procedures, the response relationship between the radial growth of *L.*

收稿日期:2022-12-10 修回日期:2023-03-28

基金项目:科技部国家野外科学观测站(生态系统)运行补助项目(2021—2025);西藏高寒植被生态安全重点实验室研究生开放基金(STAQ-2021Y-3)。

第一作者:蔡 苗。研究方向:森林生态学。E-mail:cl87811411612@163.com

* 通信作者:卢 杰,教授,博士生导师。研究方向:森林生态学。E-mail:tibetlj@163.com

kongboensis and the average temperature, maximum temperature, minimum temperature, precipitation, and humidity before and after the abrupt change was discussed. The results indicated that 1) at the early stage (February to April), the radial growth of *L. kongboensis* had a significant negative correlation with the maximum temperature. In the growth period (May to September), the radial growth was significantly and negatively correlated with relative humidity. 2) After the abrupt change of temperature, the radial growth changed from positive correlation to negative correlation with the average temperature in August, and from negative correlation to positive correlation with the minimum temperature in September. 3) In the study area, the response to climate was different in the process of radial growth of *L. kongboensis*, and the mutual transformation occurred between "positive correlation" and "negative correlation". At present, the response relationship between temperature and the radial growth of *L. kongboensis* is still significant in the study area, but the response relationship between precipitation and relative humidity is significantly enhanced. The effect of extreme temperature (minimum and maximum temperature) on the radial growth of *L. kongboensis* is significantly different.

Key words: *Larix kongboensis*; dendroclimatology; tree-ring; climatic fluctuation; Shergyla Mountain

受全球气候变暖的影响,青藏高原森林生态系统受到了显著的干扰^[1-2],自20世纪90年代起在青藏高原就开展了有关树木与气候变化的响应研究^[3-4]。传统研究观点认为,随着海拔的升高,树木对于气候的敏感性将逐步增加^[5-7]。而在近年来气候变暖的影响下,气候变化对森林生态系统的结构和功能产生了显著的影响^[8-9],最终导致适宜树木生长的环境范围逐步缩小。有研究发现,气温变化对高原地区树木生长的影响也有着显著的差异性^[10-11],气候的暖干化导致土壤缺水,使树木对气温的敏感性下降或抑制树木的径向生长,这种对树木生长表现出显著差异性的现象称为“分异现象”^[12-13]。因此在21世纪,探究不同地区树木径向生长与气候变化之间的响应关系,对于预测森林的生长及生态环境的保护有着重要的科研价值。

青藏高原作为受全球气候变化影响的敏感地区,自20世纪90年代以来,就有学者观测到高海拔地区的气温出现了大幅度的变化^[7,14-16]。与此同时,树木的生长及其对气温的响应关系受到了研究者的广泛关注^[17-18]。当前对“分异现象”虽已有大量的研究报告,但对高海拔地区仍缺乏更为深入的分析。在高海拔地区,树木的径向生长受全球气候变化的影响较为显著,表现出对气温的敏感度降低,对降水的敏感性升高。因而,通过分析这些变化有助于我们深入了解气温的变化给高海拔地区带来的影响。基于此,本研究针对藏东南色季拉山国家森林公园贡布红杉(*Larix kongboensis*),探究其对气候变化的响应效应以及树木生长-气候响应的分异现象。

1 研究区概况

色季拉山位于林芝市境内,属念青唐古拉山脉,

山脉横穿西藏中部,将西藏划分为藏南和藏北,山脉西南部与伯舒拉岭相接,东南延伸至横断山脉。山区土壤呈垂直分布,从高至低依次为高山寒漠土、高山草甸土、亚高山林灌草甸土、山地淋溶灰化土、山地酸性棕壤土、山地棕壤土等^[19]。森林的垂直分布鲜明,从高至低依次为高山寒带疏林、灌丛、草甸带、亚高山寒温带针叶林带、山地温带针叶林带、针阔混交林带^[20]。贡布红杉为西藏特有树种,当前主要分布于藏东南地区(海拔3 100~4 100 m),且与冷杉树种形成混交林。受外界环境因素、本世纪的气温以及20世纪开发建设的影响,贡布红杉的纯林及高龄树罕见。在藏东南色季拉山国家森林公园的保护下,发现人烟稀少的山谷断崖间有小面积的贡布红杉纯林^[21]。该地区受印度洋季风影响,最低气温常出现在每年1月(月均温0.2℃),最高气温常出现在每年7月(月均温15.6℃),降水量主要集中于6—9月(>120 mm)(图1),年均气温(MMT)8.3℃,全年平均降水量(AAR)762.8 mm。

2 研究方法

2.1 样本采集

2021年7月,在位于色季拉山国家森林公园鲁朗镇附近的贡布红杉森林分布下线(29°49' N, 94°44' E,海拔3 100 m)进行贡布红杉的群落调查及树芯采集,选取距离道路较远、受人为干扰小且个体间距离较远的孤立木,尽可能减少非气候因子对树木径向生长的影响。沿等高线随机设置了3个30 m×30 m的采样点。采样点平均坡度13°,林分平均郁闭度35%,采集的贡布红杉平均树高20.5 m,平均胸围95 cm。在胸径1.3 m处沿东西、南北2个方向分别钻取树芯,做好标记并放入塑胶

管中,在3个样地内采集30棵孤立木,共计采样60根树芯。

将树芯带回至试验室,按照树木年轮学的标准流程处理树芯^[22]。即将树芯自然阴干,通过肉眼判定树芯的上下位置,将确定好的树芯放入木槽中用细绳将其简单固定,用100目和400目的砂纸打磨

树芯,直至树芯的年轮边界清晰可见,将打磨好的树芯重新固定到木槽内。利用LintabTM6.0测量仪(精度0.01 mm)测量树轮宽度,将结果导入至TA-SP-Win程序中,进行交叉定年检验,并对其中部分伪年轮或丢失年轮进行修正,最终利用ARSTAN程序建立林木年轮宽度年表。

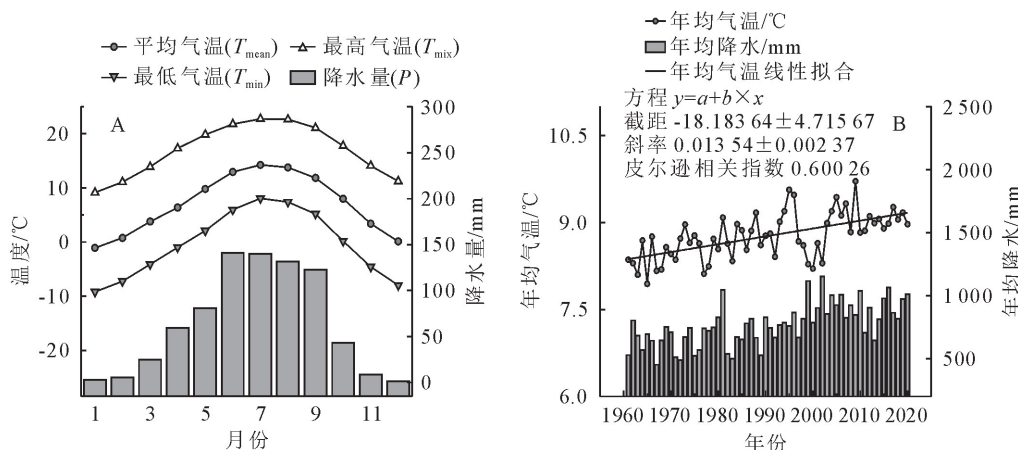


图1 色季拉山(1961—2020年)平均气温、最低气温,最高气温和相对降水量的月均及年际变化

Fig. 1 Shergyla Mountain (1961–2020) Monthly and interannual variations of average temperature, minimum temperature, maximum temperature, and average precipitation

2.2 气候数据

所用气象资料来源于距离采样点最近的气象站——西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站(29°38' N, 94°42' E, 海拔3900 m),气象数据为1961—2020年月平均气温、平均最低气温、平均最高气温,月降水量和相对湿度。由于在海拔地区树木受“滞后效应”的影响,树木的径向生长与上一年气温及降水之间可能存在有相关关系^[23-24],因此选用前一年7月至当年11月(P7C11)的气象数据(平均气温、平均最低气温、平均最高气温,月降水量和相对湿度)与树木径向生长进行相关性分析。

2.3 建立标准年表

在ARSTAN程序中选用去除树木生长趋势的方法时,根据前人的研究经验^[25-27],为消除树木年龄

及非气候因子对年轮生长的影响,采用负指数函数及双权重平均法对树木年轮宽度进行处理,最后获得3种年表:标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。考虑到极端气温(最高气温、最低气温)属于低频信号,因此选用包含信号最广的标准年表(STD)进行树木与气温的相关分析^[28-29]。

2.4 M-K检验及径向生长-气温关系分析

选用Mann-Kendall(M-K)非参数统计检验方法(图2A)检验气象数据的突变点及突变年份^[30],结合距平及平均气温累计距平^[31](图2B)确定气温的变化规律。利用SPSS 21.0计算贡布红杉标准年表与气温及降水之间的Pearson相关系数^[32]。为保证计算结果具有普适性,因此在计算相关系数的过程中,使用Bootstrap法进行1000次重复采样计算。

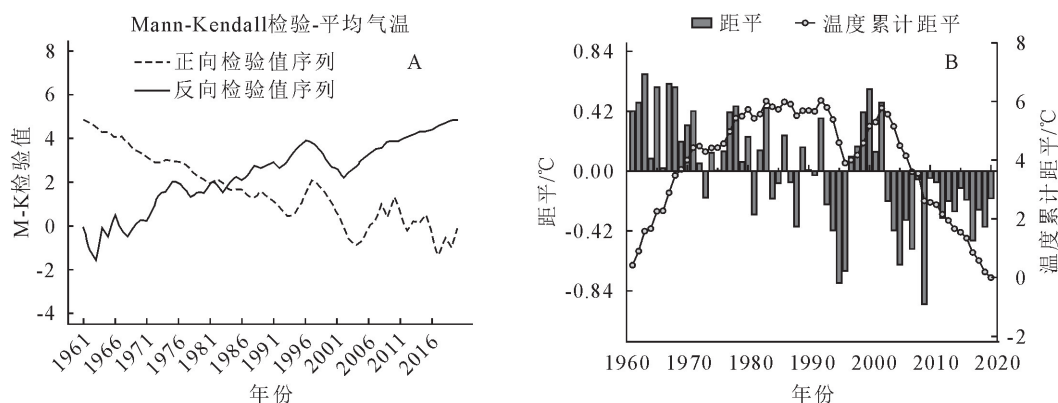


图2 年均气温 Mann-Kendall 突变检验及平均温度距平、累计距平

Fig. 2 Mann-Kendall mutation test of annual temperature, average temperature anomaly, and cumulative anomaly

3 结果与分析

3.1 贡布红杉年表统计特征及年表间各指标参数相关性分析

通过对采集点的树木年轮年表统计特征分析(表 1),年表的敏感度(M_S)、标准偏差(SD)和样芯相关系数(R_1)较大(分别为 0.22、0.25 和 0.80),表明树轮年表对气象因子的响应较为敏感;年表的信噪比(SNR)(9.52)较高,说明在年表中所包含的气候因子较强,气象信息较为完整,年表质量相对较高;一阶自相关系数(AC_1)为 0.24,表明树木的径向生长受到前一年气象因子的影响较强,对于分析气温的“滞后性”较好;第 1 主成分(PC_1)和样品总体代表性(EPS)分别为 79%和 0.98($EPS>0.85$),表明采集的树芯样本对研究区总体的表达性较好,年表的整体所包含的信息较为完整,可以开展下一步的响应分析,图 3 为贡布红杉树轮宽度指数的年际变化。

表 1 年表的统计参数及公共区间分析

Table 1 Statistical parameters and common interval analysis

样本量(树/样芯)	27/54
年表长度	1956—2020
平均敏感度(M_S)	0.22
第 1 主成分(PC_1)(%)	0.79
标准偏差(SD)	0.25
一阶自相关系数(AC_1)	0.24
信噪比(SNR)	9.52
样品总体代表性(EPS)	0.98
样芯相关系数(R_1)	0.80

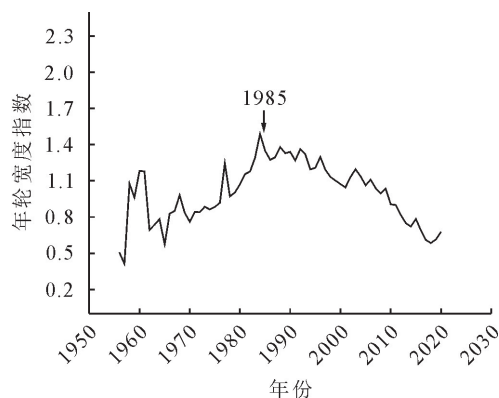


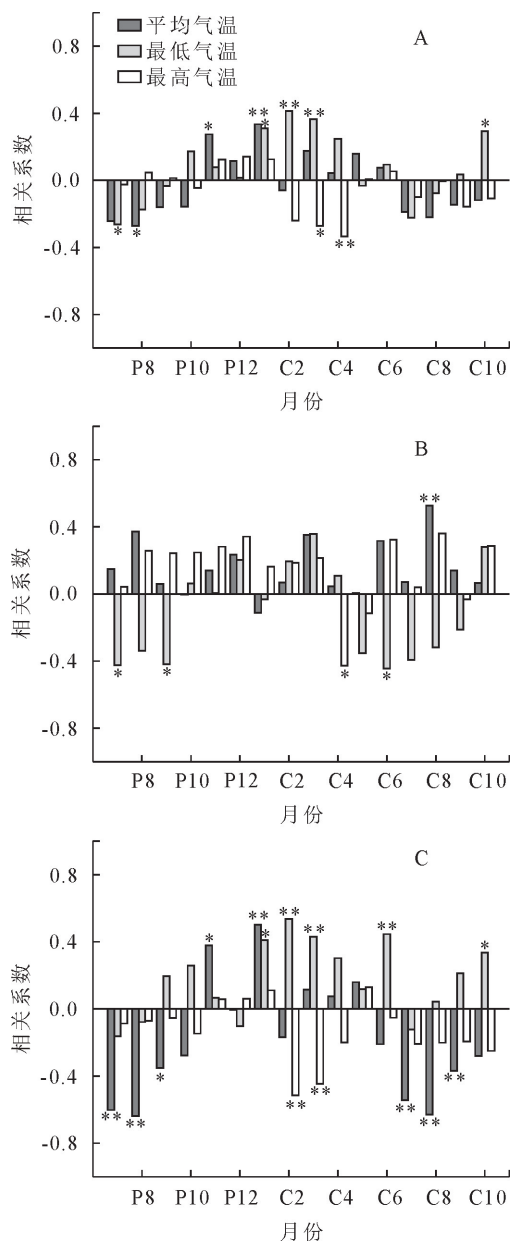
图 3 贡布红杉标准年表

Fig. 3 Standard chronology of *L. kongboensis*

3.2 林木径向生长对平均气温、最高气温和最低气温的响应

结合图 2A 和图 3,将 1985 年定为气温突变点,将 1961—1985 年定为气温突变前(简称突变前),将 1986—2020 年定为气温突变后(简称突变后)。分析图 4A 可以得出,1961—2020 年贡布红杉径向生

长受气温的影响较为明显,表现出显著的“滞后性”,与前一年 7 月(P7)最低气温及前一年 8 月(P8)平均气温呈显著负相关($P<0.05$)。结合图 4B(突变前)和图 4C(突变后)得出,在突变后贡布红杉径向生长与当年 6、9 月(C6,C9)的平均气温、最低气温和最高气温与贡布红杉的径向生长由不相关转变为负相关($P<0.05$),表现出明显的分异,而在其他月份如当年 7—9 月(C7—C9)的平均气温与贡布红杉的径向生长,也发生了“正相关”(或不相关)向负相关转变的分异。



A. 1961—2020 年; B. 1961—1985 年; C. 1986—2020 年; * / * * . 显著水平为 0.05/0.01; P 表示树轮生长的前一年月份, C 表示树轮生长当年月份。下同。

图 4 贡布红杉标准年表与气温之间的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients between *L. kongboensis* standard chronology and temperature

3.3 径向生长对降水量及相对湿度的响应

由图 5A 可以看出,1961—2020 年贡布红杉标准年表与相对湿度表现出显著的相关性,而与降水量之间的相关性则相对较弱,但结合图 5B 和图 5C 中贡布红杉标准年表与降水量和相对湿度的相关系数可发现,贡布红杉标准年表与相对湿度之间的负相关性更加显著($P < 0.01$)。其与前一年 11 月降水(P11)表现出由正相关转变为负相关的分异。而在其他月如:前一年 9—10 月(P9—P10)降水($P > 0.05$),虽然未达到显著性($P < 0.05$)水平,但同样存在有“分异现象”且相关性有明显的增强。与相对湿度之间的负相关性更加显著($P < 0.01$)。

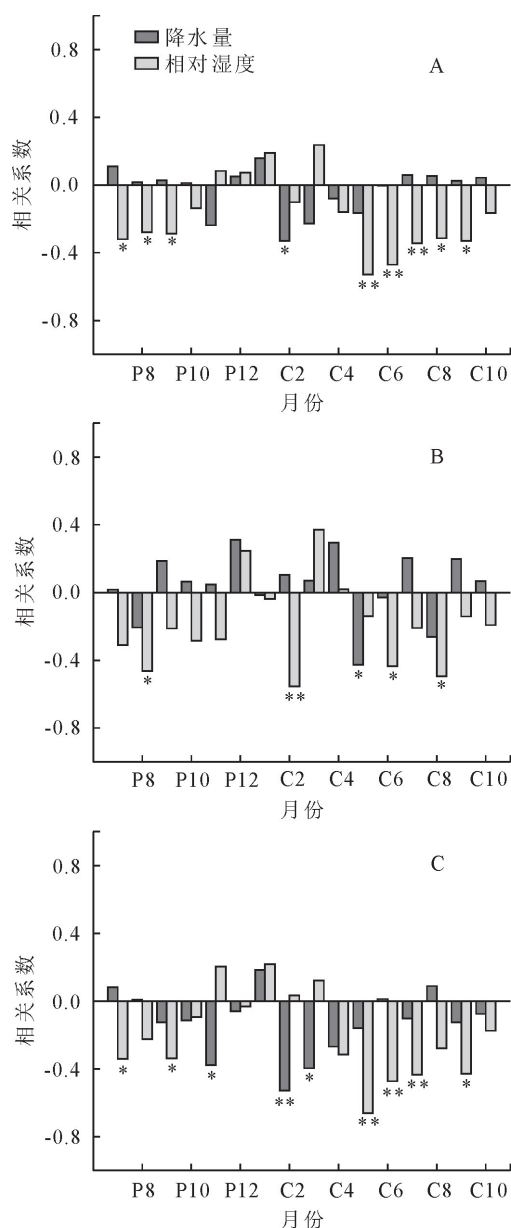


图 5 贡布红杉标准年表与降水和相对湿度之间的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between *L. kongboensis* standard chronology and precipitation and relative humidity

4 讨论

4.1 径向生长对气象因子的响应

通过贡布红杉标准年表与平均气温、最高气温、最低气温,降水量和相对湿度的 Pearson 相关分析(图 4A,图 5A),除降水量外,贡布红杉径向生长与气温及相对湿度之间均表现出显著的相关性。在生长前期(当年 1—4 月(C1—4))气温显著影响贡布红杉的径向生长。贡布红杉标准年表与前一年 7 月(P7)的最低气温及前一年 8 月(P8)的平均气温呈负相关($P < 0.05$),这表明低温对贡布红杉的径向生长有着显著的“滞后性”。而形成差异的主要原因是,在高海拔地区贡布红杉径向生长对气温的敏感性较强,贡布红杉径向生长与当年 3 月(C3)的最低气温呈显著正相关($P < 0.01$),与最高气温呈负相关($P < 0.05$),表明贡布红杉生长所需的最适温度较低。1—4 月为树木生长的关键期,树木由休眠期向生长期转变^[33-34],此时的高温会导致贡布红杉出现生理性干旱,若降水量适宜将会促进树木的生长^[35-36],但由于冬季色季拉山降雪(降雨)较少,导致这一时期贡布红杉受到高温的干旱胁迫及缺水的影响,从而显著影响了贡布红杉的径向生长。在 7 月由于贡布红杉正处于生长旺期,温度的进一步升高达到树木所需的温度,此时低温对树木径向生长的影响将明显减弱^[37-38],但对第 2 年的径向生长仍然存在有“滞后性”的影响。同时随着温度持续升高,气温对树木径向生长的影响逐步减弱^[39]。此时限制树木径向生长的外界环境因子将不再是气温。

综上所述,由于生长季初期(1—4 月)气温的升高以及降水的短缺,导致贡布红杉发生生理性缺水,同时 7—8 月在气温持续的升高过程中,温度的升高使得气温对树木径向生长的影响逐步降低。而在其他区域开展的相关研究同样表明,生长前期的最高气温及生长期的降水对树木的生长存在有明显抑制作用^[40-41]。贡布红杉与当年 5—9 月(C5—C9)的相对湿度呈负相关($P < 0.05$;图 5A),由此推测,相对湿度对贡布红杉的径向生长产生显著的干扰。生长旺季(5—9 月)树木的生长进入了活跃期,此时是树木进行光合、呼吸、合成养分的旺盛阶段,适宜的温度及降水将促进树木进行多糖的积累,对树木早材形成有着促进作用。植物的呼吸在该时期较为活跃,此时相对湿度的增加将影响贡布红杉的呼吸作用。由于外界环境湿度的增加,植物叶片内外蒸气压差变小,使气孔下腔的水蒸气不易扩散,最终导致蒸腾减弱^[42]。由此也可以得出相对湿度对贡布红杉的径向生长产生了显著的干扰。

4.2 径向生长对突变前和突变后气象因子的响应

在本研究中,通过 Mann-Kendall 突变检验、平均气温距平(图 2A,图 2B)及贡布红杉标准年表(图 3)确定了平均气温的突变时间为 1985 年,分析突变前后贡布红杉径向生长与气温、降水量和相对湿度的响应变化,与其他地区观测的结果相似^[43-44],但部分时段也存在差异。具体结果表现为,贡布红杉径向生长与 6 月的最低气温和 8 月的平均气温发生了显著的变异(图 4B,图 4C)。在突变前与当年 6 月(C6)的最低气温呈负相关($P < 0.05$),与当年 8 月(C8)的平均气温呈显著正相关($P < 0.01$);在突变后与当年 6 月(C6)的最低气温呈显著正相关($P < 0.01$),与当年 8 月(C8)的平均气温呈显著负相关($P < 0.01$)。主要原因可能是由于全球气候变暖所引起的,气温的升高致使最低气温达到树木生长的适宜温度^[45],因此表现出随着气温的升高树木径向生长与最低气温的显著性增强,这种现象在突变后(图 4C)的 1—3 月(C1—C3)极为明显,而温度的升高使得平均气温高于树木生长的最适温度,从而表现出 7—9 月的平均气温与贡布红杉的径向生长呈负相关(图 4C)。

对比图 4B 和图 4C 可知,在发生突变后贡布红杉径向生长与平均气温之间的“滞后性”明显增强,与相对湿度之间的负相关性更加显著($P < 0.01$)(图 5B,图 5C)。而对于其他月份如:与当年 2—3 月(C2—C3)的最高气温和降水量由不相关转变为负相关($P < 0.05$),与当年 6—9 月(C6—C9)的最低气温由不相关转变为显著正相关($P < 0.01$)。由于气温的升高呈现分异,使贡布红杉对气温及降水之间的响应发生了显著的变化。而这一结果也充分验证了文献^[46]的规律性变化。

5 结论

综上所述在高海拔地区树木径向生长主要受温度的影响,自 20 世纪中叶以来,在北半球的树轮宽度和密度的变化中均发现树木对气候响应的不稳定性。在气温突变后,色季拉山贡布红杉径向生长-气候响应存在显著的分异,即与 2—3 月的最高气温和降水、5—9 月的最低气温和相对湿度均表现出明显的分异规律。与此同时,受气温变化的影响,原本贡布红杉径向生长与 8 月的平均气温呈正相关转变为负相关,原本与 9 月最低气温由负相关转变为正相关。因此,今后在时间尺度上讨论气候与树木径向生长之间响应关系时应重点考虑“分异现象”对树木生长的影响。

参考文献:

- [1] 沈贝蓓,宋帅峰,张丽娟,等. 1981—2019 年全球气温变化特征[J]. 地理学报,2021,76(11):2660-2672.
SHEN B B, SONG S F, ZHANG L J, *et al.* Changes in global air temperature from 1981 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11), 2660-2672. (in Chinese)
- [2] 胡婷,孙颖,张学斌. 全球 1.5 和 2 °C 升温时的气温和降水变化预估[J]. 科学通报,2017,62(26):3098-3111.
HU T, SUN Y, ZHANG X B. Temperature and precipitation projection at 1.5 and 2 °C increase in global mean temperature[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(26), 3098-3111. (in Chinese)
- [3] 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[J]. 地理学报,1996(Supp. 1):92-101.
WU X D, SHAO X M. A preliminary study on the impact of climate change on tree growth using tree ring-width data[J]. Acta Geographica Sinica, 1996(Supp. 1):92-101. (in Chinese)
- [4] 吴祥定,林振耀. 西藏近代气候变化及其趋势的探讨[J]. 科学通报,1978(12):746-750.
WU X D, LIN Z Y. Probing modern climate change and its trend in Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 1978(12):746-750. (in Chinese)
- [5] 彭剑峰,勾晓华,陈发虎,等. 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析[J]. 生态学报,2006,26(8):2723-2731.
PENG J F, GOU X H, CHEN F H, *et al.* The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledeb to climatic change in eastern Tianshan Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8):2723-2731. (in Chinese)
- [6] 周鹏,黄建国,梁寒雪,等. 不同海拔温度和降水对新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2019,27(6):623-632.
ZHOU P, HUANG J G, LIANG H X, *et al.* Effect of temperature and precipitation on radial growth of *Larix sibirica* along an altitudinal gradient on Altay Mountain, Xinjiang, China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(6), 623-632. (in Chinese)
- [7] 薛儒鸿,焦亮,刘小萍,等. 新疆阿尔泰山不同海拔西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性评价[J]. 生态学杂志,2021,40(5):1275-1284.
XUE R H, JIAO L, LIU X P, *et al.* Evaluation of the stability of the radial growth of *Larix sibirica* at different altitudes in response to climate change in Altai Mountain, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5):1275-1284. (in Chinese)
- [8] BOGINO S, FERNANDEZ NIETO M J, BRAVO F. Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* at its southern and western distribution limits[J]. Silva Fennica, 2009, 43(4):609-623.
- [9] SHI C, MASSON-DELMOTTE V, DAUX V, *et al.* An unstable tree-growth response to climate in two 500 year chronologies, north eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Dendrochronologia, 2010, 28(4):225-237.
- [10] TSO C H M, MONTEITH D, SCOTT T, *et al.* The evolving

- role of weather types on rainfall chemistry under large reductions in pollutant emissions [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 299: 118905.
- [11] XU J L, JING B B, ZHANG K X, *et al.* Heavy metal contamination of soil and tree-ring in urban forest around highway in Shanghai, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2017, 23(7): 1745-1762.
- [12] SHI C, SHEN M, WU X, *et al.* Growth response of alpine treeline forests to a warmer and drier climate on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 73-79.
- [13] 盖学瑞, 于大炮, 王守乐, 等. 树轮-气候“分异问题”形成机制的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3273-3280.
- GAI X R, YU D P, WANG S L, *et al.* review of formation mechanism on the ‘divergence problem’ of tree growth-climate relationship [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3273-3280. (in Chinese)
- [14] SOULÉ P T, KNAPP P A, MAXWELL J T, *et al.* A comparison of the climate response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) trees among standardized measures of earlywood, latewood, adjusted latewood, and totalwood radial growth [J]. *Trees*, 2021, 35(3): 1065-1074.
- [15] RODRIGUEZ-CATON M, ANDREU-HAYLES L, MORALES M S, *et al.* Different climate sensitivity for radial growth, but uniform for tree-ring stable isotopes along an aridity gradient in *Polylepis tarapacana*, the world's highest elevation tree species [J]. *Tree Physiology*, 2021, 41(8): 1353-1371.
- [16] JEVŠENAK J, TYCHKOV I, GRIČAR J, *et al.* Growth-limiting factors and climate response variability in Norway spruce (*Picea abies* L.) along an elevation and precipitation gradients in Slovenia [J]. *International journal of biometeorology*, 2021, 65(2): 311-324.
- [17] MARQUES I G, CAMPELO F, RIVAES R, *et al.* Tree rings reveal long-term changes in growth resilience in southern European riparian forests [J]. *Dendrochronologia*, 2018, 52: 167-176.
- [18] COMEAU V M, DANIELS L D, KNOCHENMUS G, *et al.* Tree-rings reveal accelerated yellow-cedar decline with changes to winter climate after 1980 [J]. *Forests*, 2019, 10(12): 1085.
- [19] 方江平. 西藏色季拉山土壤的性状与垂直分布 [J]. *山地研究*, 1997(4): 228-233.
- FANG J P. Properties and vertical distribution of soil on Shergyla Mountain in Xizang [J]. *Journal of Mountain Research*, 1997(4): 228-233. (in Chinese)
- [20] 柴勇, 彭建松, 张国学. 西藏色季拉山种子植物区系分析 [J]. *云南林业科技*, 2003(3): 36-47.
- CHAI Y, PENG J S, ZHANG G X. Floral analysis of seed plants in Shergyla Mountain, Tibet [J]. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 2003(3): 36-47. (in Chinese)
- [21] 于德水, 卢杰, 张萌, 等. 西藏色季拉山西藏红杉径向生长对气温和降水波动的响应 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(1): 91-99.
- YU D S, LU J, ZHANG M, *et al.* Response of radial growth of *Larix griffithii* to temperature and precipitation fluctuation in Tibet Shergyla Mountain [J]. *Forest Research*, 2023, 36(1): 91-99. (in Chinese)
- [22] 吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用 [J]. *第四纪研究*, 1990(2): 188-196.
- WU X D. Application of tree ring analysis to the study of environment variation [J]. *Quaternary Sciences*, 1990(2): 188-196. (in Chinese)
- [23] 罗伦. 藏东南高山环境综合观测研究站气象观测数据 (2007—2017) [Z]. 国家青藏高原科学数据中心, 2018.
- [24] 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变—古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 1999(2): 175-184.
- YAO T D. Climatic mutation in the Tibetan Plateau during the last glacial period—a comparative study of the Guriya ice core and Greenland GRIP ice core [J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 1999(2): 175-184. (in Chinese)
- [25] TAO Q, ZHANG Q B, CHEN X. Tree-ring reconstructed diurnal temperature range on the eastern Tibetan plateau and its linkage to El Niño-southern Oscillation [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(3): 1696-1711.
- [26] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应 [J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2246-2253.
- SHANG H M, WEI W S, YUAN Y J, *et al.* Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altai Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2246-2253. (in Chinese)
- [27] 华亚伟. 基于树木年轮的秦岭中部南北坡油松对气候的响应与区域气候重建 [D]. 西安: 西北大学, 2020.
- [28] 吴祥定, 孙力, 程志刚. 若干青藏高原上树木年轮年表的建立 [J]. *科学通报*, 1988(8): 616-619.
- WU X D, SUN L, CHENG Z G. Establishment of tree ring chronology on several Tibetan plateaus [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1988(8): 616-619. (in Chinese)
- [29] 吴祥定, 孙力, 湛绪志. 利用树木年轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试 [J]. *地理学报*, 1989(3): 334-342.
- WU X D, SUN L, ZHAN X Z. A preliminary study on reconstructing past climate in the middle Xizang Plateau by using tree-ring data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989(3): 334-342. (in Chinese)
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [31] 赵国永, 韩艳, 刘明华, 等. 1951—2014 年内蒙古自治区极端气温事件时空变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(12): 110-116.
- ZHAO G Y, HAN Y, LIU M H, *et al.* Characteristics of temporal and spatial variations of extreme temperature events in Inner Mongolia during 1951—2014 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(12): 110-116. (in Chinese)
- [32] 石仁娜·加汗, 张同文, 喻树龙, 等. 天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 327-338.
- SHIRENNA J, ZHANG T W, YU S L, *et al.* *Picea schrenkiana* response to climate change at different altitudes in Tianshan mountain [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 327-338. (in Chinese)

- [33] NIENSTAEDT H. Dormancy and dormancy release in white spruce[J]. Forest Science, 1966, 12(3): 374-384.
- [34] ROHDE A, BHALERAO R P. Plant dormancy in the perennial context [J]. Trends in Plant Science, 2007, 12(5): 217-223.
- [35] BARGUÉS-TOBELLA A, HASSELQUIST N J, BAZIÉ H R, *et al.* Trees in African drylands can promote deep soil and groundwater recharge in a future climate with more intense rainfall[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(1): 81-95.
- [36] ELLISON D, SPERANZA C I. From blue to green water and back again: promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel[J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 140002.
- [37] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 等. 芦芽山华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 树轮宽度年表对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1608-1618.
- LI Y J, WANG S Y, NIU J J, *et al.* Climate-radial growth relationship of *Larix principis-rupprechtii* at different altitudes on Luya Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1608-1618. (in Chinese)
- [38] 梁非凡, 朱清科, 王露露, 等. 陕北黄土区油松径向生长对气候因子的响应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(5): 33-41.
- LIANG F F, ZHU Q K, WANG L L, *et al.* Influence of climate factors on radial growth do *Pinus tabulaeformis* in Loessate of northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(5): 33-41. (in Chinese)
- [39] 郭冬, 张同文, 吐尔逊·哈斯木, 等. 西昆仑山两个针叶树种径向生长及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10226-10240.
- GUO D, ZHANG T W, TURSUN H, *et al.* Radial growth of two coniferous species in the western Kunlun Mountains and its response to climate change[J]. Acta ecologica sinica, 2022, 42(24): 10226-10240. (in Chinese)
- [40] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应—基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1733-1742.
- PENG J J, HE X Y, CHEN Z J, *et al.* Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in north China to climate change and elevated CO₂: a simulation-based on BIOME-BGC model and tree-ring data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1733-1742. (in Chinese)
- [41] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 等. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256-267.
- WU Q, DING J, YAN H, *et al.* Effects of simulated precipitation and nitrogen addition on seedling growth and biomass in five tree species in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 256-267. (in Chinese)
- [42] 容文婷, 邢福武, 易绮斐. 澳门 5 种植物叶变色盛期对气候因子的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(6): 574-582.
- RONG W T, XING F W, YI Q F. Effects of climatic factors on leaf discoloration peak period of 5 species in Macao[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(6): 574-582. (in Chinese)
- [43] 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.
- ZHANG Q, YU R D, ZHENG H W, *et al.* Response analysis of *Larix sibirica* to climate warming at different elevations in the eastern Tianshan mountain[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(1): 14-25. (in Chinese)
- [44] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2246-2253.
- SHANG H M, WEI W S, YUAN Y J, *et al.* Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Altai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2246-2253. (in Chinese)
- [45] 陈振举, 陈玮, 何兴元, 等. 沈阳福陵油松年轮宽度年表的建立[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 100-109.
- CHEN Z J, CHEN W, HE X Y, *et al.* Development of Chinese pine tree-ring width chronology in Fuling mausoleum, Shenyang of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(4): 100-109. (in Chinese)
- [46] WANG X, YANG B. Divergent tree radial growth at alpine coniferous forest ecotone and corresponding responses to climate change in northwestern China[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107052.