

玉龙雪山不同针叶树种树轮宽度年表特征 及其与气候因子的关系

李嘉宁¹, 张 贇^{1*}, 田 昆¹, 曹仁杰¹, 覃鑫浩²

(1 西南林业大学 湿地学院/国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 2 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714)

摘 要:为揭示滇西北高原树木径向生长与气候关系的规律, 该研究分别在玉龙雪山采集高山松(*Pinus densata*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)年轮样本, 建立 3 个树种树轮宽度差值年表, 将年轮指数与气候因子进行响应分析和冗余分析, 以明确影响玉龙雪山树木径向生长的主要气候因子, 为该区域森林生态系统的管理保护提供依据, 并为探讨气候变化背景下滇西北森林动态提供依据。结果表明: (1) 所建立的 3 个树种树轮宽度差值年表具有较少的低频变化, 且离散程度较低、逐年变化共性较高, 可代表采样点树木的年轮特征; 高山松、云南松和云南铁杉差值年表的平均敏感度依次分别为 0.21、0.22 和 0.17, 样本总体代表性分别为 0.96、0.96 和 0.94, 均高于 0.85 的阈值, 说明年表中信息具有代表性。(2) 响应分析结果显示, 高山松径向生长与当年 2 月的降水量呈显著正相关关系; 云南松径向生长与当年 5 月的平均气温和最高温呈显著负相关关系, 与当年 10 月平均气温呈显著正相关关系; 云南铁杉径向生长与当年 1 月和 5 月的降水、当年 10 月相对湿度均呈显著正相关关系, 与当年 5 月最高气温呈显著负相关关系。(3) 冗余分析结果显示, 当年 1 月降水、2 月降水、5 月干旱指数对 3 个树种均具有促进作用, 且 5 月干旱指数的显著相关性最强; 当年 10 月降水的增加有利于高山松和云南铁杉的径向生长, 但对云南松径向生长具有抑制作用。研究认为, 当年冬季降水、5 月湿润条件以及 10 月降水是影响玉龙雪山 3 个树种径向生长的重要环境因子; 若干暖化趋势加剧, 将不利于滇西北高原 3 个树种的生长, 从而影响区域森林生态系统结构和功能。

关键词: 树木年轮; 气候响应; 阳性树种; 横断山区; 径向生长

中图分类号: Q945.112; S791

文献标志码: A

Tree-Ring Width Chronology Characteristics of Different Conifers and Their Relationship with Climate Factors on Yulong Snow Mountain

LI Jianing¹, ZHANG Yun^{1*}, TIAN Kun¹, CAO Renjie¹, QIN Xinhao²

(1 National Plateau Wetlands Research Center/College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Academy of Forestry Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: In order to reveal the relationship between tree radial growth and climate in the Northwestern Yunnan Plateau, the study collected tree-ring samples of *Pinus densata*, *Pinus yunnanensis* and *Tsuga dumosa* on Yulong Snow Mountain, established a chronology of the difference between the ring width of three tree species, and analyzed the response and redundancy analysis of the ring index and climatic factors to identify the main climatic factors affecting the radial growth of trees in Yulong Snow Mountain. It provides a basis for the management and protection of forest ecosystems in the region, and for exploring the

收稿日期: 2021-10-22; 修改稿收到日期: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(31600395); 云南省高原湿地科学创新团队项目(2012HC007); 云南省教育厅科学研究基金(2018Y118)

作者简介: 李嘉宁(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为树木年轮学。E-mail: lijianing0411@163.com

* 通信作者: 张 贇, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为树木年轮学。E-mail: zhangyuncool@163.com

forest dynamics of Northwest Yunnan under the background of climate change. The results showed that: (1) the established chronology of the width difference between the three tree species has few low frequency changes, and the degree of dispersion is low, and the commonality of the year-on-year change is high, which can represent the annual ring characteristics of the trees at the sampling point; the mean sensitivity of the differential chronology of *P. densata*, *P. yunnanensis* and *T. dumosa* is 0.21, 0.22 and 0.17, respectively, and the overall representativeness of the sample is 0.96, 0.96 and 0.94, respectively, all of which are higher than the threshold of 0.85, indicating that the information in the chronology is representative. (2) In response function analysis, the radial growth of *P. densata* was significantly and positively correlated with the current February precipitation. The radial growth of *P. yunnanensis* was significantly and negatively correlated with the mean temperature and maximum temperature of current May, and was significantly and positively correlated with the mean temperature of current October. The radial growth of *T. dumosa* was significantly and positively correlated with the precipitation of current January and May and the relative humidity of current October, and was significantly and negatively correlated with the maximum temperature of current May. (3) The results of the redundancy analysis showed that the precipitation of current January and February, and The Palmer Drought Severity Index (PDSI) of current May promoted the radial growth of three species, and the correlation coefficient of PDSI was the strongest. The increase in precipitation of current October enhanced the radial growth of *P. densata* and *T. dumosa*, while inhibited *P. yunnanensis* growth. The study believes that the winter precipitation, moisture conditions of May and October precipitation in the current year were main environmental factors affecting the radial growth of three species on Yulong Snow Mountain. If warming and drying trends intensified, it will not be conducive to the growth of the three tree species in the northwest Yunnan plateau, thereby affecting the structure and function of the regional forest ecosystem.

Key words: dendrochronology; climate response; shade-intolerant species; Hengduan Mountains; radial growth

近年来,全球气温上升,降水频率和强度发生变化,极端天气事件增多^[1-2]。气候变化对环境的影响已成为当今世界的热点问题^[3-4]。陆地生态系统的主体是森林,森林中的树木通过年轮记载了气候变化情况^[5]。因此研究树轮有利于了解气候变化,树轮中记载的历史气候信息可用于气候重建^[6]。

横断山地处青藏高原东南缘,属气候变化敏感区,滇西北高原位于横断山中段,近50年来干暖化趋势明显^[7]。目前,在该区域已开展较多树木年轮的研究,典型树种有长苞冷杉(*Abies georgei*)^[8]、丽江云杉(*Picea likiangensis*)^[9]、麦吊云杉(*Picea brachytyla*)^[10]、大果红杉(*Larix potaninii*)^[11]、云南铁杉(*Tsuga dumosa*)^[12]和 高山松(*Pinus densata*)^[13]。研究发现,滇西北树木生长受气温与降水共同影响,树种对气候变化的响应存在树种及地域差异。因此,研究同一区域不同树种年轮宽度特征及其与气候因子的相关性,有利于全面掌握影响某区域树木生长的主要气候因子,同时也是气候重建的基础,为预估全球气候变化背景下的森林动态具有重要意义。

玉龙雪山是滇西北高原的一座典型雪山,鉴于其生态系统保存完好,植被垂直带谱明显,是开展树木年轮研究工作的理想场所。前人的研究多着重于

单一树种海拔梯度上树木生长对气候变化的响应,例如丽江云杉^[14]、长苞冷杉^[15]和云南松(*Pinus yunnanensis*)^[16],但不同树种气候敏感性差异的研究较少。因而有必要针对不同树种开展气候响应研究,加强响应异同分析。

本研究选取玉龙雪山高山松、云南松和云南铁杉3个针叶树种,根据树木年轮学方法^[17],分析不同针叶树种树轮宽窄变化与气候因子间的关系,揭示影响玉龙雪山树木径向生长的主要气候因子,为该区域森林生态系统的管理保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

云南省丽江市玉龙雪山,位于 $27^{\circ}03'02''\sim 27^{\circ}18'57''N$, $100^{\circ}04'02''\sim 100^{\circ}16'30''E$ 之间。该地区垂直地带性明显,森林植被类型由下至上主要为暖温性针叶林(云南松、高山松及云南铁杉为主要树种)与寒温性针叶林(丽江云杉、大果红杉和长苞冷杉为主要树种)。云南松的海拔分布为2000~3200 m,高山松主要分布在2700~3500 m之间,二者均为喜光、深根性树种,生于干旱瘠薄土壤。云南铁杉的海拔分布为2500~3500 m,对水湿和光照要求较

高,不耐干旱,喜肥沃酸性土壤。3个树种均为滇西北高原的主要树种,在造林及用材方面发挥着重要作用,具有较高的生态价值及一定的经济价值,其中高山松为西部高山地区特有树种,云南松为西南地区乡土树种^[18]。

玉龙雪山地处中国西南季风气候区,气候有明显的季节性变化,具体表现为夏季较短,冬季较长,干湿季明显,雨热同期,根据丽江气象站 1951~2016 年的资料,其年平均温度为 12.9℃,年总降水量为 954.9 mm,6~9 月降水集中,占 81%(图 1)。丽江地区年均降水量趋势无明显变化(图 2),年均温趋势呈显著上升(图 3),该地区整体呈干暖化趋势。

1.2 样品采集

2018 年 5 月和 2020 年 7 月,在玉龙雪山分别采集高山松、云南松和云南铁杉分年轮样品,采样点设置在未受人为干扰的森林群落,选择胸径较大、生长良好的高山松、云南松和云南铁杉,按照国际树木年轮数据库的采样标准采集样芯。使用生长锥(内

径 5.15 mm)在树高 1.3 m 处,从两个不同方向钻取 3 个样芯,每一根样芯都要取到髓心。共采集 88 棵树,160 个样芯,其中高山松 28 棵树 55 个样芯,云南松 30 棵树 56 个样芯和云南铁杉 30 棵树 49 个样芯。将取到的样芯放入先准备好的塑料吸管内,并用油性笔编号标注,并且详细记录采样点的基本特征(表 1)。

1.3 年表建立

样本按照 Smiley 和 Stokes 国际通用的操作方法进行预处理^[19]。待样本自然风干后,对其进行标准化的处理,在显微镜下目视定年,然后将其置于 EPSON Scan (Espression11000XL) 扫描仪中进行扫描,扫描后的图像利用 Coorecorder ver. 7.3 和 CDendro 专业软件(精度 0.001 mm)测出年轮宽度^[20]。使用 COFECHA 程序^[21]测试测量结果。为了保证测年的准确性,根据 COFECHA 结果,剔除了与主序相关性低,年轮不完整和不清晰的样本。最后,用 46 根高山松、55 根云南松和 42 根云南铁杉树芯建立年表。采用 ARSTAN 程序^[22]对已完成交叉定年的年轮宽度数据去趋势,除趋势时用 67% 的样条函数进行拟合,通过比较统计,在 3 个年表的每个统计量中,差值年表(RES,图 4)都优于其他年表,因此本研究应用差值年表来分析气候因素。

1.4 气象数据收集

本研究选取平均降水、帕尔默干旱指数(PDSI)、相对湿度、平均温、最低温和最高温 6 个气候因子用于分析与树木生长的关系。平均降水、相对湿度、平均温、最低温和最高温数据来源于距离采样点最近的丽江气象站(1951~2016 年)。PDSI 从全球气候研究单位(CRU)网格(<http://www.cru.uea.ac.uk/data/>)以 0.5 度空间分辨率下载获取^[23]。

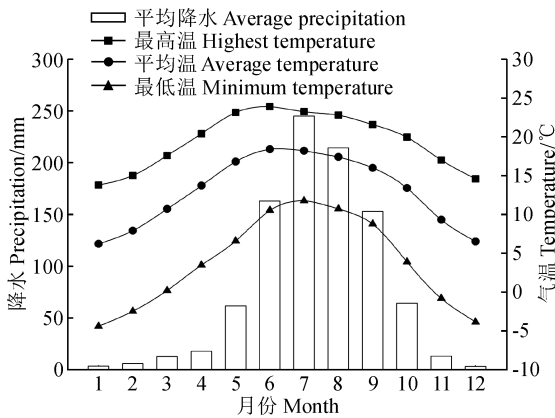


图 1 丽江气象站多年气温和降水量分布

Fig. 1 Monthly temperature and precipitation in Lijiang meteorological station

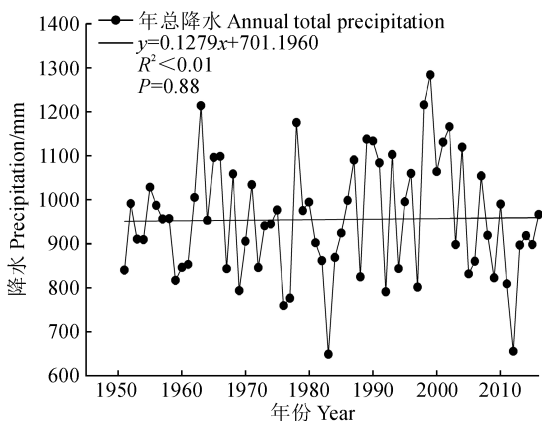


图 2 丽江降水变化趋势

Fig. 2 Precipitation change trend in Lijiang

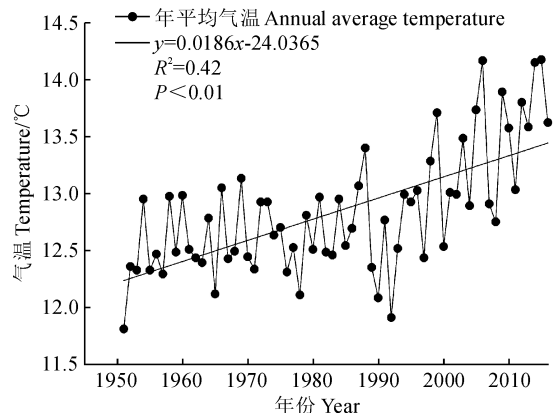


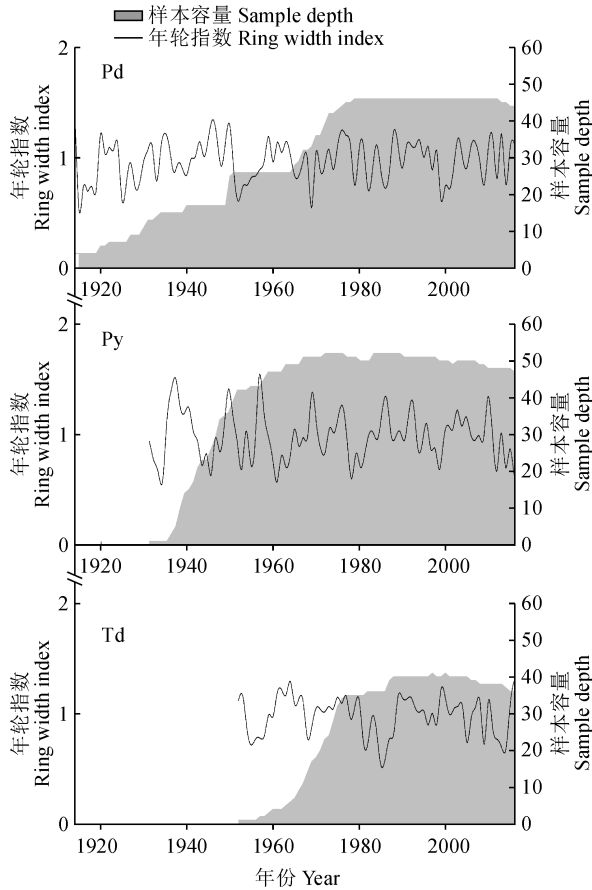
图 3 丽江气温变化趋势

Fig. 3 Temperature change trend in Lijiang

表1 年轮采样点基本概况

Table 1 Description of sampling sites for three ring collections

树种 Species	代码 Code	采样时间 Sampling time	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	样本量(树/样芯) No. (tree/core)
高山松 <i>Pinus densata</i>	Pd	2 018.5	3 317	100°13'42"	27°08'00"	28/55
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	Py	2 020.7	2 935	100°04'16"	27°09'48"	30/56
云南铁杉 <i>Tsuga dumosa</i>	Td	2 020.7	3 161	100°15'39"	27°10'00"	30/49



Pd. 高山松; Py. 云南松; Td. 云南铁杉; 下同

图4 3个树种的差值年表和样芯数

Pd. *Pinus densata*; Py. *Pinus yunnanensis*; Td. *Tsuga dumosa*;

The same as below

Fig. 4 Residual chronologies and radii numbers of the three species

1.5 数据处理

应用 DendroClim2002 软件对差值年表与公共区间(1978~2016年)的气候因子进行响应分析,显著相关性取 $P < 0.05$ 。由于上一年气候会影响当年树木生长,即“滞后效应”,因此选择上年生长季末到当年生长季末的气候因子进行响应分析。参考前人对玉龙雪山树木生长的研究^[14-15],发现多应用上年9月到当年10月时间段的气候因子进行响应分析,结果能较好地反映滞后效应作用。因此本研究选择

上年9月至当年10月的平均降水、帕尔默干旱指数(PDSI)、相对湿度、平均温、最低温和最高温与3个树种的差值年表进行逐月相关分析。为了更好地得出公共气候因子对树木生长的影响,运用 CANOCO4.5 软件对3个树种与气候变化的生长响应进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 年表统计量特征

年表统计量表明(表2),差值年表具有较少的低频变化、较低的离散程度、较高的逐年变化共性,能代表采样点树木的年轮特征。按照高山松、云南松和云南铁杉差值年表排序,平均敏感度分别为0.21、0.22和0.17;样本总体代表性分别为0.96、0.96和0.94,均高于0.85的阈值,说明年表中信息具有代表性,可进行后续的相关分析。

2.2 径向生长对气候因子的响应分析

如图5、6所示,当年2月的降水对高山松径向生长起促进作用。云南松径向生长与当年5月最高温和平均温呈显著负相关,10月平均温升高有利于其生长。云南铁杉径向生长与当年1月和5月降水、当年10月相对湿度均呈显著正相关,但与当年5月最高温呈显著负相关。

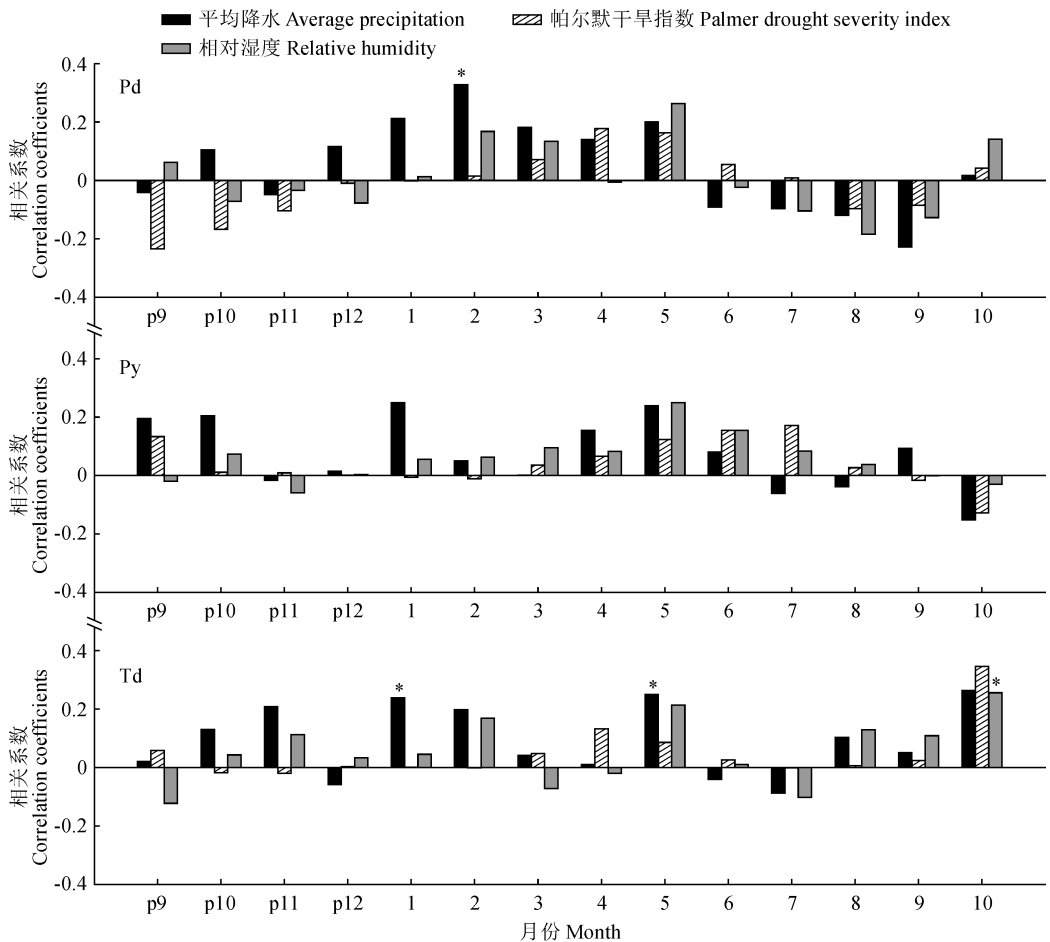
2.3 径向生长与气候因子的冗余分析

高山松、云南松、云南铁杉3个树种差值年表,与上年9月至当年10月的降水、帕尔默干旱指数(PDSI)、相对湿度、平均温、最低温和最高温的冗余分析结果(图7)中只显示与年表显著相关($P < 0.05$)的气候因子,向量越长表示气候因子越重要,气候向量与年表向量夹角的余弦值代表年数与气候因子的相关系数。两者方向相同表示正相关,方向相反表示负相关。图7表明在84个气候变量中,当年1月降水、2月降水、5月干旱指数这3个气候变量对3个树种均为促进作用,5月干旱指数的显著相关性最强。当年10月降水的增加有利于高山松和云南铁杉的径向生长,但对云南松径向生长具有抑制作用。

表 2 年表统计参数及公共区间分析

Table 2 Statistics of ring-width chronologies and common interval analysis

项目 Item	高山松 <i>Pinus densata</i>	云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	云南铁杉 <i>Tsuga dumosa</i>
样本量(树/样芯) Number (tree/core)	25/46	30/55	26/42
序列长度 Time span/A. D	1874~2017	1931~2019	1952~2019
差值年表 Residual chronologies			
EPS>0.85 起始年样芯数 Year since EPS>0.85/cores	1933/14	1939/11	1968/13
平均敏感度 Mean sensitivity	0.21	0.22	0.17
公共区间 Common intervals/a	1974~2017	1952~2016	1978~2017
公共区间统计量 Common interval analysis (1978-2016)			
标准差 Standard deviation	0.17	0.19	0.16
信噪比 Signal-to-noise ratio	21.05	22.01	14.95
样本总体代表性 Expressed population signal	0.96	0.96	0.94
第一主成分方差解释量 Variance in first eigenvector/%	38.02	40.26	38.17



p 表示上一年,下同; * 表示 $P < 0.05$ 处存在显著差异

图 5 树轮宽度差值年表与气候因子的响应分析

p indicates the last year, the same as below; * indicates a significant relationship at 0.05 level

Fig. 5 Response function analysis between residual chronologies and climatic factors

3 讨论

本研究响应函数与冗余分析结果表明,树木径向生长与降水、干旱指数、相对湿度表现出更多的显

著相关关系(多为正相关),与温度正相关关系仅在云南松(10月)有所表现,说明3个树种径向生长更受湿润条件影响。这与以往温度和降水共同作用于玉龙雪山不同海拔丽江云杉^[14]及长苞冷杉^[15]树木

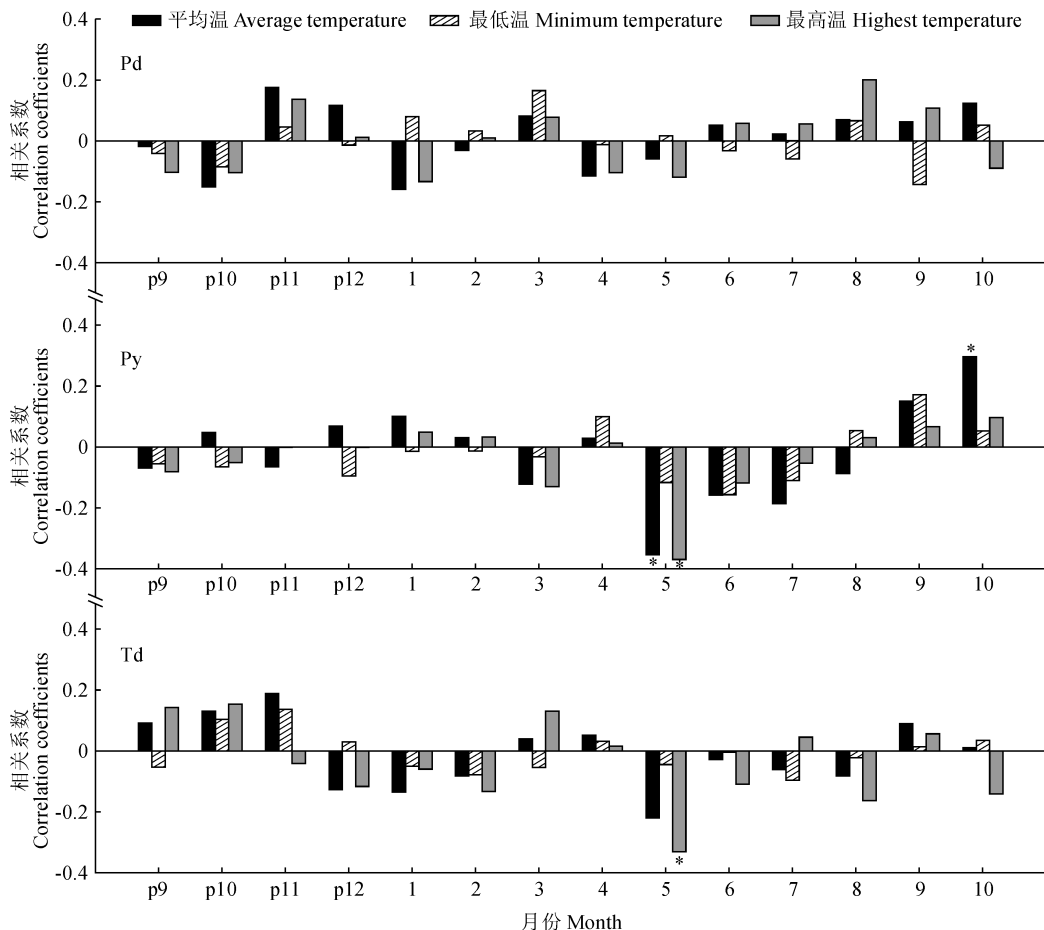
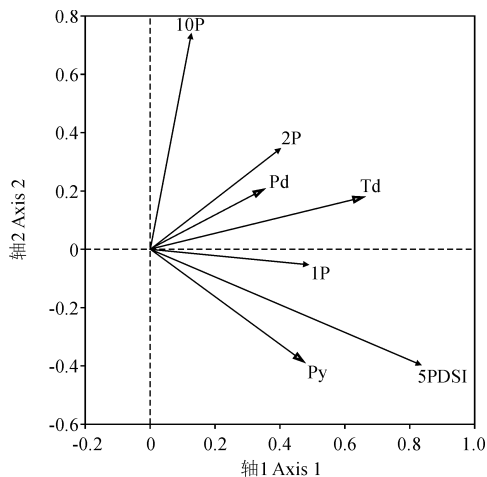


图 6 树轮宽度差值年表与温度的响应分析

Fig. 6 Response function analysis between residual chronologies and temperature



10P. 10月降水; 2P. 2月降水; 1P. 1月降水; 5PDSI. 5月帕尔默干旱指数

图 7 差值年表与气候因子的冗余分析

10P. October precipitation; 2P. February precipitation; 1P. January precipitation; 5PDSI. May palmer drought severity index

Fig. 7 Redundancy analysis between residual chronologies and the climatic variables

3.1 相关关系的共性

影响 3 个树种径向生长的关键气候因子是当年 5 月份的湿润条件,主要体现在 3 个树种径向生长与 5 月份干旱指数呈正相关关系(图 7),与 5 月份降水呈正相关(图 5),与 5 月份最高温呈负相关(图 6)。进入 5 月树木生长迅速,需水量较大,而此时温度高而降水少(图 1),温度升高会加强树木蒸腾作用和土壤的蒸发,若降水补充不足,会导致干旱胁迫,从而不利于树木生长^[26-27]。有关春季干旱胁迫的研究在丽江的云南松^[16]、相邻哈巴雪山的云南松与高山松^[28]、云南中西部的云南铁杉^[12]均有报道,说明春季湿润条件对玉龙雪山树木生长具有重要影响。

冬季降雪(1~2 月降水)的增加有利于 3 个树种径向生长(图 5 和图 7),这是因为较多的降雪可以产生保温层用来抵御低温对树木生长的危害^[29]。另外冬季降雪的增多,意味着春季融雪后土壤水分的增加,在生长初期为树木生长提供水分保障^[28]。这与滇西北高原玉龙雪山丽江云杉^[14]和长苞冷杉^[15]气候响应结果一致,亦说明冬季降雪对滇西北地区主要树种径向生长起促进作用。另外青藏高原

生长的结果不同,在一定程度上反映了不同针叶树种年轮宽度年表特征及其与气候关系的差异^[24-25]。

东南部色季拉山树木年轮研究结果也表明,冬季降水的增加有利于树木生长^[30]。

3.2 相关关系的差异性

当年 10 月平均温与降水同时影响云南松径向生长,分别呈显著正相关与负相关(图 6 和图 7),说明 10 月的光热条件对于云南松的径向生长是重要环境条件,这也反映了云南松的喜光特性。10 月份云南松形成层活动还未停止,生长季末期温度升高有利于生长季的延长,从而有利于形成宽轮。在邻近四川红杉^[31]树轮研究中也发现当年生长季末期光热条件的促进作用。而降水增多,伴随的是低温及太阳辐射的减少,从而减弱光合作用,导致有机物积累减少。

与之相反,10 月的降水增加促进云南铁杉与高山松的径向生长,这种响应差异可能与树种的生物学习性和立地条件有关。相比于云南松,云南铁杉更为喜湿,生长季末期的光热条件不会成为其生长的限制条件,降水增加反而有利于其碳水化合物的生产及有机物的积累。云南松在排水不良时生长不佳^[18],10 月过多的降水反而不利于其生长。而高山松对土壤排水性要求不高,且其多生长于贫瘠且持水力较差的土壤^[24],生长盛期已将土壤中的水分消耗殆尽,10 月降水增多增加了土壤中的可利用水分,从而增加光合产物的生产以促进宽轮形成。

3.3 响应分析与冗余分析的比较

本研究中,冗余分析在揭示树木生长对气候因子的响应模式上更有优势,相比于响应分析,能够更加准确呈现响应规律,从而得出冬季降水、春季湿润环境、10 月降水这 3 个共性因子对 3 个树种的重要作用。例如在响应分析中,1~2 月的降水虽然与 3 个树种都呈正相关,但仅高山松(2 月)与云南铁杉(1 月)达到显著相关。5 月的降水、相对湿度和干旱指数也与 3 个树种表现为正相关,但仅云南铁杉(5 月降水)呈显著相关,不利于规律的归纳总结。另外,10 月温度升高对云南松的促进作用是冗余分析未检测到的,说明 2 种分析方法具有一定的一致性,与互补性,响应分析与冗余分析的综合应用,可以更全面地反映影响 3 个树种生长的主要气候因子^[32]。

本研究表明,玉龙雪山 3 个针叶树种径向生长受当年 1 月、2 月、5 月及 10 月湿润条件的影响较大。依据 Xu 等^[33]的气候模型(PRECIS)预测,未来 50 年云南地区的温度将持续上升,若降水不足将加剧干暖化趋势,从而对树木生长产生不利影响。高山松、云南松和云南铁杉径向生长对气候响应的异同研究,是对滇西北高原树木年轮研究的有益补充,可为不同树种气候敏感性研究提供参考,更有利于准确揭示影响区域树木生长的关键气候因子,为气候变化背景下的森林保护与管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(7): 874-883.
QIN D H. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, **33**(7): 874-883.
- [2] MATSKOVSKY V, Kuznetsova V, Morozova P, et al. Estimated influence of extreme climate events in the 21st century on the radial growth of pine trees in Povolzhie region (European Russia) [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **611**(1): 12 047.
- [3] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 44-65.
- [4] 开买尔古丽·阿不来提, 毛东雷, 曹永香, 等. 新疆玉龙喀什河与策勒河流域胡杨年轮对气象因子的响应研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(4): 672-681.
KAMARGUL A, MAO D L, CAO Y X, et al. Response of *Populus euphratica* Annual Rings to Meteorological Factors in Yurungkash and Cele River Basins of Xinjiang [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(4): 672-681.
- [5] 康利飞, 叶茂. 塔里木河中游胡杨径向生长对气温和径流量的响应[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(4): 697-705.
KANG L F, YE M. Response of radial growth of *Populus euphratica* to temperature and runoff in the Middle Reaches of the Tarim River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(4): 697-705.
- [6] FRITTS H C. Tree Rings and Climate [M]. London: Academic Press, 1976.
- [7] FAN Z X, BRÄUNING A, CAO K F. Tree-ring based drought reconstruction in the central Hengduan Mountains region (China) since A. D. 1655 [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, **28**(14): 1 879-1 887.
- [8] PANTHI S, BRÄUNING A, ZHOU Z K, et al. Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, Southwestern China [J]. *Dendrochronologia*, 2018, **47**: 1-9.
- [9] GUO G A, LI Z S, ZHANG Q B, et al. Dendroclimatological studies of *Picea likiangensis* and *Tsuga dumosa* in Lijiang, China [J]. *IAWA Journal*, 2009, **30**(4): 435-441.
- [10] FAN Z X, BRÄUNING A, CAO K F. Annual temperature reconstruction from the central Hengduan Mountains, as deduced

- from tree rings [J]. *Dendrochronologia*, 2008, **26**: 97-107.
- [11] CUI J N, QIN J H, SUN H. Population Spatial Dynamics of *Larix potaninii* in Alpine Treeline Ecotone in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, China [J]. *Forests*, 2017, **8**(10): 356.
- [12] 陈 瑶. 云南中西部干旱变化的树轮记录研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [13] ZHANG Y, YIN D C, SUN M, *et al.* Variations of climate-growth response of major conifers at upper distributional limits in Shika Snow Mountain, Northwestern Yunnan plateau, China [J]. *Forests*, 2017, **8**(10): 337.
- [14] 张 贇, 尹定财, 田 昆, 等. 玉龙雪山不同海拔丽江云杉径向生长对气候变异的响应[J]. 植物生态学报, 2018, **42**(6): 629-639.
- ZHANG Y, YIN D C, TIAN K, *et al.* Radial growth responses of *Picea likiangensis* to climate variabilities at different altitudes in Yulong Snow Mountain, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, **42**(6): 629-639.
- [15] 张 贇, 尹定财, 田 昆, 等. 玉龙雪山东坡不同海拔长苞冷杉径向生长与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2 355-2 361.
- ZHANG Y, YIN D C, TIAN K, *et al.* Relationship between radial growth of *Abies georgei* and climate factors at different altitudes on the eastern slope of Yulong Snow Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2 355-2 361.
- [16] 杨绕琼, 范泽鑫, 李宗善, 等. 滇西北玉龙雪山不同海拔云南松(*Pinus yunnanensis*)径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(24): 8 983-8 991.
- YANG R Q, FAN Z X, LI Z S, *et al.* Radial growth of *Pinus yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors in the Yulong Snow Mountain, Northwest Yunnan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8 983-8 991.
- [17] 王 婷, 于 丹, 李江凤, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1): 23-33.
- WANG T, YU D, LI J F, *et al.* Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, **27**(1): 23-33.
- [18] 吴征镒. 云南植被[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [19] STOKES M A, SMILEY T L. An Introduction to Tree-ring Dating [M]. Tucson: The University of Arizona Press, 1996.
- [20] LARSSON L A. CDendro v. 7. 3. Cybis Elektronik & Data AB [M]. Sweden: Saltsjöbaden, 2010.
- [21] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, **43**: 69-75.
- [22] 赵守栋, 江 源, 焦 亮, 等. ARSTAN 程序和 R 语言 dplR 扩展包进行树轮年表分析的比较研究[J]. 生态学报, 2015, **35**(22): 7 494-7 502.
- ZHAO S D, JIANG Y, JIAO L, *et al.* A comparative analysis of ARSTAN and the dplR package of R language in analyses of tree-ring chronologies [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7 494-7 502.
- [23] HARRIS I, JONES P D, OSBORN T J, *et al.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 dataset [J]. *International Journal of Climatology*. 2014, **34**(3): 623-664.
- [24] 王 荷, 胡文彬, 熊莹莹, 等. 滇西北哈巴雪山 2 个针叶树种径向生长与气候因子的关系[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, **41**(5): 1-7.
- WANG H, HU W B, XIONG Y Y, *et al.* The relationship between radial growth of two conifer trees and climatic factors in Haba Snow Mountain [J]. *Journal of Southwest Forestry University* (Nat. Sci. Edi.), 2021, **41**(5): 1-7.
- [25] FAN Z X, BRÄUNING A, CAO K F, *et al.* Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains in Southern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(3): 306-313.
- [26] 吴 普, 王丽丽, 黄 磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性[J]. 地理研究, 2006, **25**(1): 43-52.
- WU P, WANG L L, HUANG L. A preliminary study on the tree-ring sensitivity to climate change of five endemic conifer species in China [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(1): 43-52.
- [27] LIANG E Y, LEUSCHNER C, DULAMSUREN C, *et al.* Global warming-related tree growth decline and mortality on the Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2016, **134**(1/2): 163-176.
- [28] ZHANG Y, CAO R J, YIN J, *et al.* Radial growth response of major conifers to climate change on Haba Snow Mountain, Southwest China [J]. *Dendrochronologia*, 2020, **60**: 1 125-7 865.
- [29] 石仁娜·加汗, 张同文, 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 H, ZHANG T W, *et al.* *Picea schrenkiana* response to climate change at different altitudes in Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(2): 327-338.
- [30] LIANG E Y, WANG Y F, XU Y, *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.
- [31] 庞 鑫, 张 萌, 石松林, 等. 近 65 年来四川红杉径向生长对气候变暖的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(3): 568-576.
- PANG X, ZHANG M, SHI S L, *et al.* Radial growth response of *Larix mastersiana* to climate warming in the last 60 years [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, **27**(3): 568-576
- [32] 王晓春, 宋来萍, 张远东. 大兴安岭北部樟子松树木生长与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(3): 294-302.
- WANG X C, SONG L P, ZHANG Y D. Climate-tree growth relationships of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Northern Daxing'an Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(3): 294-302.
- [33] XU Y L, HUANG X Y, ZHANG Y, *et al.* Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2005, **2**: 50-53.