

DOI: 10.5846/stxb201805311214

杨绕琼, 范泽鑫, 李宗善, 温庆忠. 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. 生态学报, 2018, 38(24):

Yang R Q, Fan Z X, Li Z S, Wen Q Z. Radial growth of *Pinus yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors in the Yulong Snow Mountain, Northwest Yunnan, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24):

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

杨绕琼^{1,2}, 范泽鑫^{1,*}, 李宗善³, 温庆忠⁴

1 中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 勐腊 666303

2 中国科学院大学, 北京 100049

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

4 云南省林业调查规划院, 昆明 650051

摘要: 云南松 (*Pinus yunnanensis*) 是重要的造林树种, 在我国西南地区广泛分布。研究不同海拔云南松径向生长对气候变化的响应, 有助于了解气候变化背景下云南松的敏感性和适应性。在滇西北丽江玉龙雪山不同海拔采集了云南松树木年轮样品, 采用传统的树木年轮方法制作了不同海拔云南松树轮宽度标准化年表, 并分析了不同海拔云南松径向生长与气候因子的相关性。结果表明: 1) 低海拔样点云南松具有较快的年平均生长速率。2) 不同海拔云南松对气候因子的响应模式一致, 树轮宽度与当年 5—6 月的降水量、帕尔默干旱指数 (PDSI) 和相对湿度呈正相关, 与同期温度呈负相关。3) 不同海拔的云南松径向生长对气象因子的响应程度不一样, 即低海拔样点云南松树轮宽度与当年 5 月份的干旱指数、相对湿度、降水量相关系数较高; 而高海拔样点的云南松树轮宽度与 5—6 月的降水、相对湿度、干旱指数的相关系数较低。本研究表明春末夏初的水分条件是玉龙雪山云南松径向生长的主要限制因子, 且低海拔地区云南松生长受水分限制更为严重, 区域气候变暖和干旱化趋势可能对低海拔地区云南松的生长产生持续的负面效应。本研究结果可为探讨气候变化下云南松的适宜分布区、以及云南松人工林的经营和可持续管理提供参考。

关键词: 树木年轮; 气候响应; 海拔梯度; 干旱; 云南松

Radial growth of *Pinus yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors in the Yulong Snow Mountain, Northwest Yunnan, China

YANG Raoqiong^{1,2}, FAN Zexin^{1,*}, LI Zongshan³, WEN Qingzhong⁴

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

4 Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Kunming 650051, China

Abstract: *Pinus yunnanensis* is an important commercial timber tree species in southwestern China. Investigation on the radial growth of *P. yunnanensis* at different elevations and their responses to climatic factors is essential for understanding climatic sensitivity and adaptation of this economical important species under global climate change. We collected tree increment cores of *P. yunnanensis* from two elevational sites in the Yulong Snow Mountain, northwest Yunnan Province,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31770533); 国家重点研发计划第五课题 (2016YFC0502105); 云南省森林资源年度监测项目

收稿日期: 2018-05-31; **修订日期:** 2018-11-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanzexin@xtbg.org.cn

China. Two ring-width standard dendrochronologies were developed using traditional dendrochronological techniques and their growth-climate correlations were analyzed. The results showed that 1) *P. yunnanensis* at lower elevation site grew faster than those at higher elevation site. 2) Radial growth of *P. yunnanensis* correlated positively with precipitation, relative humidity, and the Palmer Drought Severity Index (PDSI), but correlated negatively with air temperatures during the early growing season from May to June. 3) The sensitivity of radial growth of *P. yunnanensis* to moisture availability differed between different elevations, with higher positive correlations between tree-ring chronology and precipitation, relative humidity, and PDSI at lower elevation than that of higher elevation. These results demonstrated that radial growth of *P. yunnanensis* in the Yulong Snow Mountain was mainly limited by moisture availability during the late spring and early summer season. Regional warming and drying climate may have negative effects on tree growth of *P. yunnanensis*, especially at low elevations. Our results provide important implications for understanding potential distribution shifts of *P. yunnanensis* under future climate changes, as well as sustainable management of pine plantations in southwest China.

Key Words: tree rings; climate response; elevation gradient; drought; *Pinus yunnanensis*

水热条件是影响树木生长的重要环境因子,在全球气候变化^[1]的背景下,森林生态系统如何响应、如何发展成为迫在眉睫的研究课题。全球不同地区均有研究表明近几十年来树木生长呈下降趋势^[2],死亡率升高,乃至发生森林衰退^[3-4]。高海拔地区对气候变化更为敏感^[5],在滇西北地区对长苞冷杉(*Abies georgei*)^[6]、云南松(*Pinus yunnanensis*)^[7]和丽江云杉(*Picea likiangensis*)^[8]的研究均发现“生长分异”现象,即树木径向生长对气候因子的响应在 20 世纪 80 年代之前和之后的响应不同。在不同的海拔梯度上,环境条件随海拔梯度改变,树木的径向生长往往受不同的环境因子限制,通常高海拔地区树木生长主要受温度的限制,而低海拔地区树木生长主要受水分多寡的影响^[6,9-11]。但也有研究显示在不同海拔上树木生长对气候因子呈一致的响应^[12]。因此,有必要研究不同地区不同物种径向生长和气候响应特征随海拔的变异规律。

横断山脉地处青藏高原东南边缘,地形复杂,河谷深切,是生物多样性热点地区^[13],也是国内最早开展树轮研究的区域之一^[14-15],研究树种主要集中在冷杉(*Abies*)、云杉(*Picea*)、铁杉(*Tsuga*)等针叶树种。横断山中部地区长苞冷杉主要受生长季初期的水分条件和生长季旺期温度条件限制^[6,16],冬季温度也会影响其径向生长^[17]。丽江云杉在不同地区对气候的响应不同,在香格里拉小中甸地区生长受上一生长季的水热条件限制,对帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)的变化不敏感^[8];在玉龙雪山丽江云杉的生长与 1—5 月的 PDSI 显著正相关,而与温度负相关^[16,18],在石卡雪山海拔上限丽江云杉与当年 7 月份温度显著正相关,而前一年 8 月和当年 4—5 月较低的降水量则限制生长^[19]。松属植物(*Pinus*)在横断山脉分布广阔,但对松树长期生长趋势和气候敏感性的研究还相对缺乏。在石卡雪山海拔分布上限的高山松(*P. densata*)主要受前一年生长季后期、当季生长季前期温度的影响^[19];川西高原高山松的年轮宽度主要受 5 月份的降水影响,最大密度与夏季温度有关^[20]。在滇西北香格里拉地区,云南松的径向生长与冬季温度极显著正相关^[8]。

云南松作为云南省分布最广的重要用材树种,对其气候变化敏感性的研究还很缺乏。本文以滇西北地区丽江玉龙雪山为研究区域,运用树木年代学的方法,选取两个不同海拔的云南松样点,研究云南松径向生长对气候变化的响应特征及其海拔差异。拟解决:1) 丽江玉龙雪山地区云南松径向生长的主要限制因子是什么? 2) 不同海拔云南松径向生长对气候因子的响应是否一致? 本研究将探究云南松的气候敏感性规律,并为我国西南地区云南松人工林的管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

横断山脉属青藏高原南缘部分,海拔梯度明显,是金沙江、怒江、澜沧江“三江并流”的区域。玉龙雪山位于横断山脉中南部(图 1),在不同海拔由下而上分布着云南松林、丽江云杉林、大果红杉(*Larix potaninii*)

Batalin var. *macrocarpa* Law) 林、冷杉林^[21]。该地区气候主要受东南季风和西南季风影响,雨热同期(图 2),年均温 13.7℃,最高气温在 6 月(23.9℃),最低气温在 1 月(0℃),年总降水量 955 mm,1 月至 5 月降水较少,6 月至 10 月降水较多,夏季降水量占全年的 65%。

1.2 样品采集与年表建立

本研究所用云南松树轮样品采自丽江高山植物园内(图 1)。低海拔的采样点(PYLJL,海拔 3225 m)位于哈冷古水库旁边,地势平缓,向南,土壤砂石较多,云南松为建群种,伴生树种黄背栎(*Quercus pannosa*)和大白杜鹃(*Rhododendron decorum*);高海拔的采样点(PYLJH,海拔 3443 m)位于山谷,坡向东南,土壤有砂石,云南松为建群种和优势种,伴生树种川滇高山栎(*Q. aquifolioides*)、大白杜鹃(*R. decorum*)。

树轮样品采集于 2017 年 10 月,选择样地中胸径较大,生长健康的云南松,每个样点采集至少 20 棵树,利用树木生长锥在胸高(~1.3 m)处每棵树采集两个样芯。样品装进塑料吸管带回实验室,用胶带固定在平板上风干,防止弯曲,然后固定在木架上用颗粒度逐渐变细(200 目至 2000 目)的砂纸进行打磨,直到年轮清晰可见。在体式显微镜(徕卡 M50)下,用树木年轮分析仪(Rinntech, LINTAB 6)测定每个年轮宽度(精确到 0.001 mm),在 TSAP-Win 软件环境下通过曲线比较、t-检验等进行交叉定年,确定每个年轮的准确年份。经交叉定年后的宽度序列,在 ARSTAN 程序^[22]中采用负指数函数方法进行去趋势和标准化,最终建立两个样点云南松年轮宽度的标准年表。

1.3 气象数据采集

本研究的气象数据从中国气象科学数据共享数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)上获得。气象数据选择离采样点最近的丽江站(100.21°E, 26.86°N, 海拔 2393.2 m),包括降水量(Precipitation, PRE)、平均气温(Mean air temperature, MT)、最低气温(Minimum air temperature, T_{\min})、最高气温(Maximum air temperature, T_{\max})、相对湿度(Relative humidity, RH)。研究区帕尔默干旱指数(PDSI)格点数据从网络(<http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/pdsi.html>)获取,采用离采样点最近的 4 个格点数据(27.25°N, 100.25°E; 27.25°N, 99.75°E; 26.75°N, 99.75°E; 26.75°N, 100.25°E)平均得到(图 1)。

1.4 数据分析

为了分析影响云南松生长的主要气候因子,我们采用 Pearson 相关分析的方法来分析年轮宽度指数与不同气象因子的相关性,分析时间段为 1952 年 1 月至 2016 年 12 月,考虑到树木生长可能会受前一年生长的影

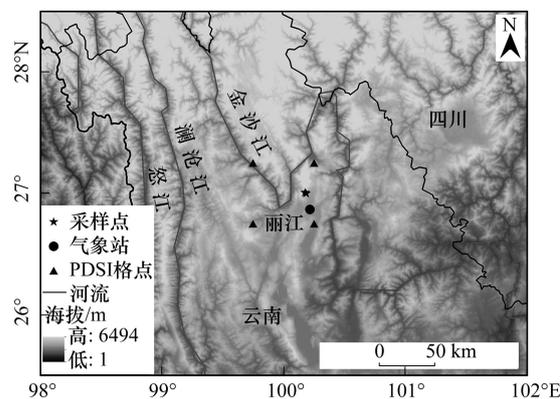


图 1 滇西北玉龙雪山云南松树轮采样点和丽江气象站位置

Fig. 1 Locations of sample sites of *P. yunnanensis* and meteorological station in the Yulong Snow Mountain

★树轮采样点, ▲PDSI 格点, ●气象站

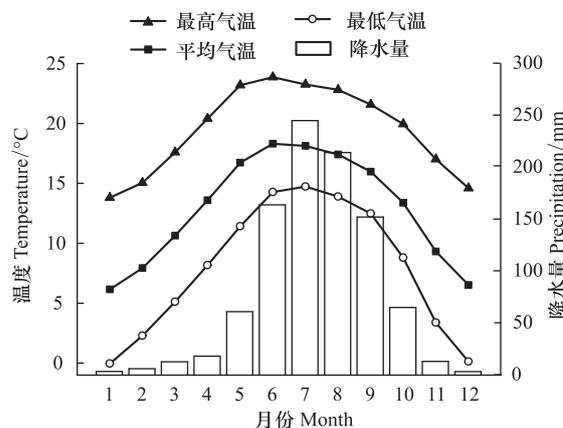


图 2 丽江气象站 1951—2016 年多年平均温度(℃)和降水量(mm)分布图

Fig. 2 Monthly temperature (°C) and precipitation (mm) averaged over the period 1951—2016 in the Lijiang meteorological station

T_{\max} : 最高气温 Maximum air temperature; MT: 平均气温 Mean air temperature; T_{\min} : 最低气温 Minimum air temperature; PRE: 降水量 Total precipitation

响,选取了前一年6月到当年10月(共17个月)的气象因子进行分析。绘图由 OriginPro 8 软件完成。

2 结果

2.1 年表特征分析

由两个采样点的年表特征(表1)分析可知,低海拔的样点(PYLJL)比高海拔样点(PYLJH)云南松生长速率快,平均敏感度高,一阶自相关系数较低,说明低海拔的云南松对环境变化更敏感。低海拔样点树轮宽度年表在1986年出现极低值,高海拔样点树轮宽度年表在1960年出现极低值(图3)。

表1 滇西北玉龙雪山不同海拔云南松样点和树轮宽度标准年表统计信息

Table 1 Sampling locations and statistics of tree-ring width standard chronologies of *Pinus yunnanensis* in the Yulong Snow Mountain, northwest Yunnan, China

年表 Standard chronologies	PYLJL	PYLJH
经度 Longitude	E100.18	E100.17
纬度 Latitude	N27.00	N27.01
海拔 Elevation/m	3225	3443
坡度 Slope	5	25
树芯(样木)数量 Number of cores (trees)	41 (22)	39 (22)
起止时间 Chronology span	1966—2017	1940—2017
平均生长速率 Average growth rate (mm/a)	2.358	1.866
标准差 Standard deviation	0.293	0.295
平均敏感度 Mean sensitivity	0.269	0.232
一阶自相关 1st Autocorrelation	0.334	0.349
序列间的平均相关系数 Mean inter-series correlation	0.309	0.208
* 信噪比 Signal-to-noise ratio (SRN)	13.479	4.048
* 样本总体代表性 Expressed population signal (EPS)	0.931	0.802

PYLJL, 云南松丽江低海拔采样点; PYLJH, 云南松丽江高海拔采样点; * 信噪比和样本总体代表性来自公共区间 1977—2017 年

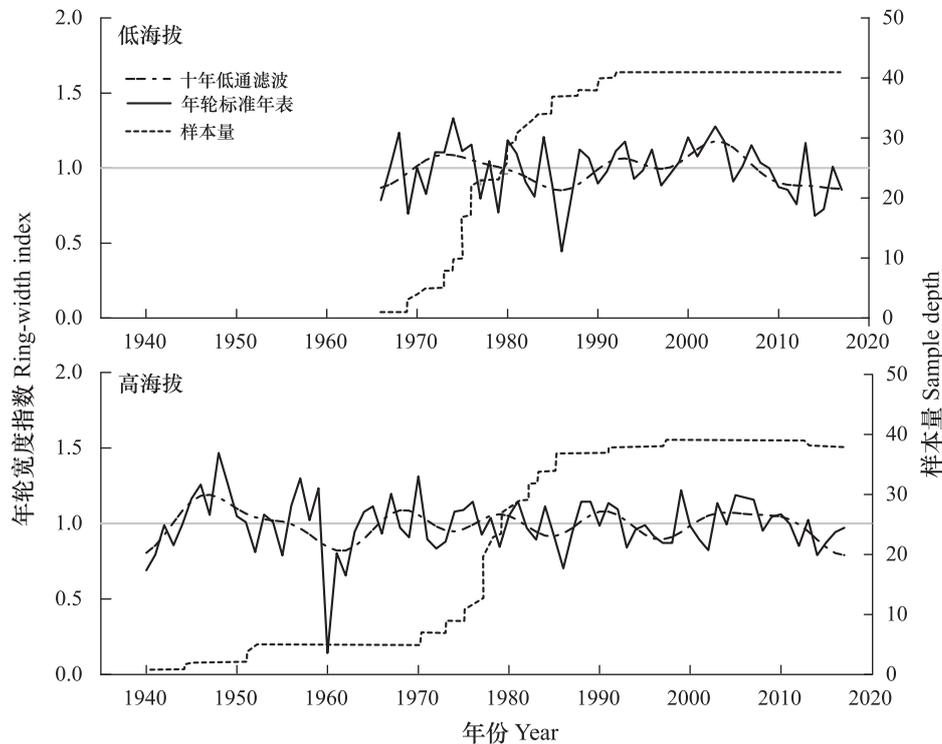


图3 滇西北玉龙雪山低海拔(PYLJL)和高海拔(PYLJH)云南松年轮宽度标准年表和样本量

Fig.3 Tree ring-width standard chronologies and sample depths of *P. yunnanensis* from low (PYLJL) and high (PYLJH) elevations in the Yulong Snow Mountain, northwest Yunnan, China

2.2 径向生长对气候变化的响应

云南松树轮宽度标准年表与水分相关的气候因子相关分析结果表明(图4),水分状况是影响该地区云南松径向生长的主要气候因子。其中低海拔云南松树轮宽度年表与前一年11月份、当年5月份的降水显著正相关,而与当年8月份的降水负相关;与相对湿度和帕尔默干旱指数(PDSI)几乎都是正相关关系,特别是当年5月份的相对湿度,相关性系数高达0.66($P \leq 0.01$);从前一年冬季至当年夏季,低海拔样点云南松径向生长与PDSI指数均达到显著正相关关系,5月份相关系数达到0.6($P \leq 0.01$)。高海拔样点与当年5月降水、相对湿度、干旱指数成正相关,但相关系数小于低海拔样点。

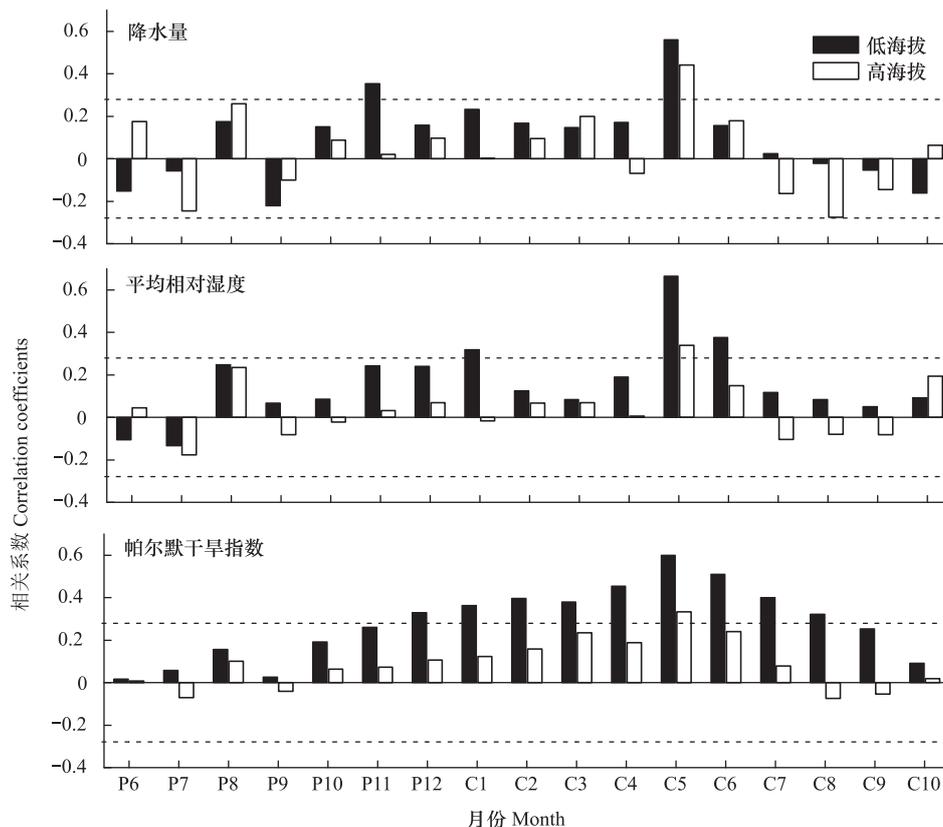


图4 滇西北玉龙雪山低海拔(PYLJL)和高海拔(PYLJH)云南松树轮宽度标准年表与降水量(PRE)、平均相对湿度(RH)、帕尔默干旱指数(PDSI)的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between tree ring-width standard chronologies of *P. yunnanensis* at low (PYLJL) and high (PYLJH) elevations and precipitation (PRE), relative humidity (RH) and Palmer Drought Severity Index (PDSI)

横坐标中P代表前一年月份,C代表当年月份;虚线代表达到0.05水平的显著相关

云南松树轮宽度标准年表与温度的相关分析结果(图5)表明,温度对该地区的云南松径向生长也有一定的影响。低海拔和高海拔样点云南松宽度年表均与当年5—6月温度呈负相关,特别是低海拔样点与温度的相关更为显著,与平均最高温度和平均温度的相关系数分别达-0.68和-0.62($P \leq 0.01$)。云南松生长还与前一年11月、当年10月的最低温度和平均温度显著正相关。

云南松胸高断面面积增长量(Basal area increment, BAI)与年平均PDSI干旱指数的趋势分析结果显示,低海拔样点的云南松的长期生长趋势与帕尔默干旱指数(PDSI)变化趋势一致,2000年以后PDSI指数下降,云南松生长也表现出下降趋势(图6)。高海拔样点云南松胸高断面面积增长量(BAI)比低海拔样点低,和PDSI的变化趋势一致性较差。

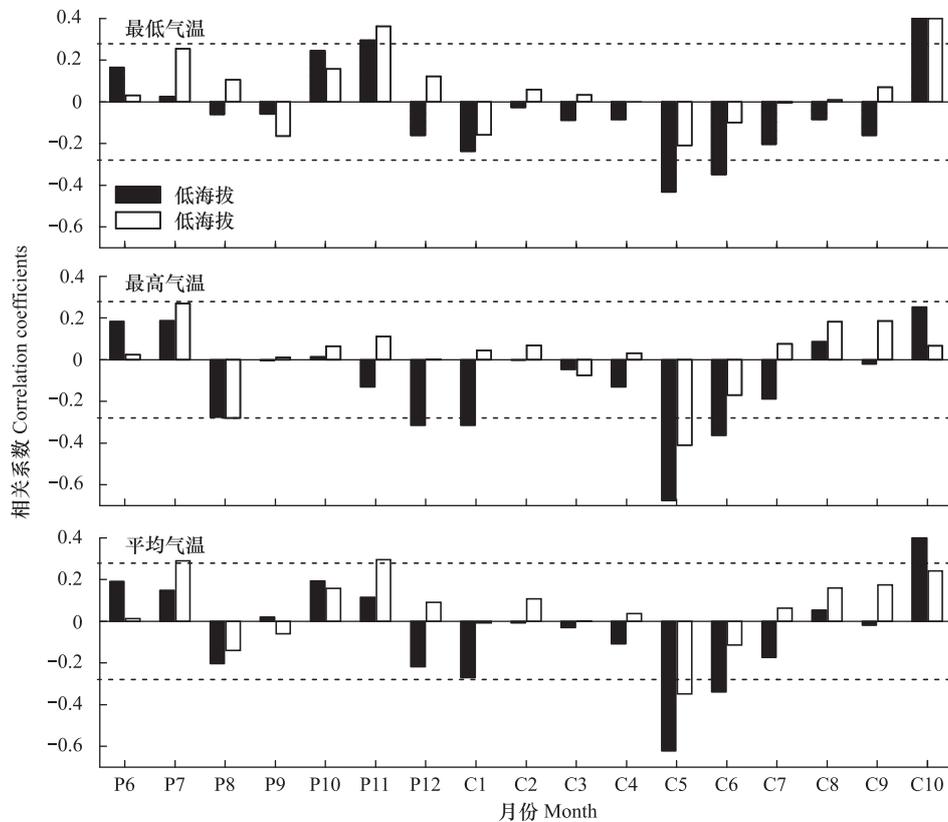


图5 滇西北玉龙雪山低海拔(PYLJL)和高海拔(PYLJH)云南松年轮宽度年表与最低气温(T_{\min})、最高气温(T_{\max})、平均气温(MT)相关系数

Fig.5 Correlation coefficients between tree ring-width standard chronologies of *P. yunnanensis* at low (PYLJL) and high (PYLJH) elevations and monthly minimum air temperature (T_{\min}), maximum air temperature (T_{\max}) and mean air temperature (MT)

横坐标中P代表前一年月份,C代表当年月份;虚线代表达到0.05水平的显著相关

3 讨论

3.1 不同海拔云南松径向生长差异

研究结果显示,高海拔的云南松生长速率低于低海拔的生长速率(表1),这主要是由温度和生长季长度差异造成的。在高海拔地区,温度相对较低,树木的生理活性受到影响^[23],水分吸收和碳固定都相对较慢。此外,温度对树木生长季长短影响很大,高海拔较低的温度可能缩短植物适宜的生长季长度^[24-25],这种生长速率随海拔梯度变化的规律在青藏高原南部、东南部等高海拔地区的研究也有相同的结果^[6,26]。低海拔样点的平均敏感度(MS)、信噪比(SNR)、样本总体代表性(EPS)都高于高海拔样点,即低海拔的云南松对气候敏感性更高。年轮宽度与气象因子的相关分析结果显示云南松生长受限于水分可利用性(图4、图5),低海拔温度较高,植物蒸腾和土壤蒸发导致的水分丧失较快,树木生长对水分的敏感性更高。

3.2 玉龙雪山云南松径向生长主要受水分状况的限制

云南松径向生长与气象因子相关性分析(图4)表明,水分状况是限制云南松径向生长的重要环境因子。树轮宽度年表与帕尔默干旱指数(PDSI)在不同季节都呈正相关关系。对玉龙雪山地区丽江云杉的树轮研究也发现,丽江云杉的径向生长与前一年11月至当年9月的PDSI干旱指数均呈正相关,特别是与春季的干旱指数相关最为显著^[18]。PDSI反映土壤水分的可利用程度^[27],土壤可利用水分可以直接影响形成层活动,进而影响木质部的形成^[28]。形成层细胞的分裂和增大通常在细胞内膨压充分饱和的时候进行,因此水分状况还会影响形成层活动时间来间接影响木质部形成^[29]。降水和相对湿度与树轮年表的正相关也表明了玉龙雪

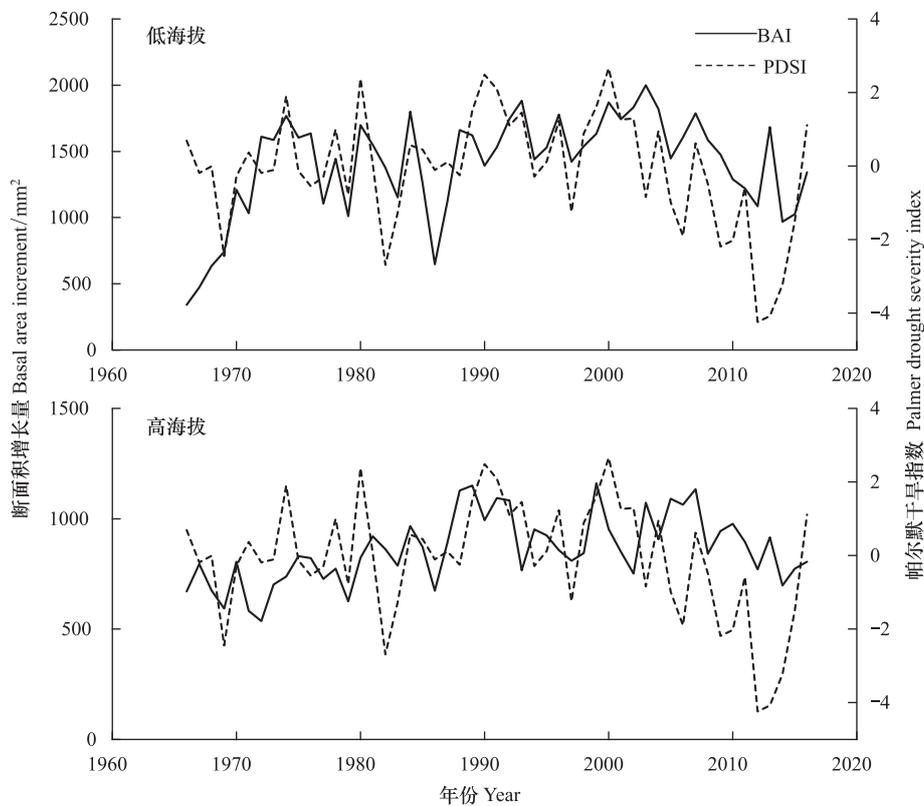


图 6 滇西北玉龙雪山地海拔 (PYLJL) 和高海拔 (PYLJH) 云南松断面积增长量 (BAI) 与年平均帕尔默干旱指数 (PDSI) 的对比

Fig.6 Long-term variability of annual averaged Palmer Drought Severity Index (PDSI) and basal area increment (BAI) of *P. yunnanensis* at low (PYLJL) and high (PYLJH) elevations on the Yulong Snow Mountain

山地区云南松的径向生长受制于土壤水分供给状况。当年 5 月的降水、相对湿度、PDSI 干旱指数与年轮宽度呈极显著正相关,5 月树木生长进入旺盛期,树木需要充足的水分来促进木质部细胞的扩大,但季风降水还不充足,土壤可利用水分成为限制树木生长的关键因子。在对云南铁杉(*Tsuga dumosa*)^[30-31]、丽江云杉^[18]、云南冷杉(*A. forrestii*)、长苞冷杉^[6,10]等树种的研究中也发现生长季初期的降水增加对年轮的生长具有促进作用。低海拔云南松的生长与前一年 11 月份降水呈显著正相关关系,上一生长季末期的较好的水分条件可能会增加了光合产物的积累,从而促进下一年的早材细胞的生长。

与温度的相关分析发现(图 5),前一年 11 月的高温对云南松的生长有促进作用,特别是平均最低温影响较为显著,与对滇西北石卡雪山的高山松研究结果一致^[19]。在丽江,10 月处于云南松生长季末期,温度开始降低,树木还没有休眠,较高的温度有利于光合产物的积累^[32],对当年生长和下一年的生长都具有促进作用。相反,低温可能导致树木的根系和针叶受到损伤,且在干旱年份更为严重,从而影响到下一年的早材形成。5 月、6 月的温度与云南松生长呈极显著负相关。5 月温度升高,植物蒸腾和地表水分蒸发作用加强,土壤水分散失严重,但是降水远远不足(图 1),土壤可利用水分下降限制树木生长^[30],6 月份降水增多,高温造成的干旱限制程度降低,但还是显著影响生长。这与在泰国北部南亚松(*P. merkusii*)、卡西亚松(*P. kesiya*)^[33],玉龙雪山丽江云杉^[31]的研究结果一致。

3.3 不同海拔云南松径向生长对气候的响应程度有差异

对比不同海拔云南松与气候因子相关分析(图 4,图 5)发现,不同海拔的树木生长对气候因子的响应趋势基本一致,但是响应程度不同。低海拔云南松树轮年表与前一年 12 月至当年 8 月的 PDSI 干旱指数都呈显著正相关,其断面积增长量年际变化趋势与 PDSI 的变化一致(图 6)。而高海拔样点云南松树轮年表与 PDSI 相关性仅在当年 5 月达到显著,低海拔树木对温度的敏感性较低,但水分的可利用性严重制约着树木生长,而

中高海拔对冬季低温更加敏感^[10]。低海拔地区温度比高海拔地区高,植被蒸腾和地表蒸发造成土壤水分散失严重,加之低海拔的样点土壤砂石较多,保水能力差,导致低海拔的云南松生长受水分限制更为严重。高海拔云南松径向生长与夏季降水呈负相关,与夏季 PDSI 干旱指数几乎不相关,夏季降水增多常常伴随着辐射和日照时数减少,可能一定程度上造成树木的光合作用减弱^[12]。高海拔云南松对前一年 7 月、11 月的温度更敏感,温暖的夏季可以促进形成层活动,形成更多的光合产物^[34]。

4 结论

本研究表明,滇西北玉龙雪山地区云南松的径向生长主要受土壤可利用水分的限制,特别是 5—6 月份的降水和湿度与年轮宽度极显著正相关,同期高温则导致植被蒸腾和地表蒸发增强,树木受干旱胁迫程度加剧,进而限制其径向生长速率。与高海拔相比,低海拔地区的云南松径向生长速率较高,且对春末夏初的降水和湿度变化敏感性高,更容易受到水分限制。在全球气候变暖和区域干旱化的趋势下,低海拔地区云南松的生长受到的水分制约可能会更加严重,出现生长减缓或衰退的可能性更大。

参考文献 (References):

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 3-32.
- [2] van der Sleen J P. Environmental and Physiological Drivers of Tree Growth: A Pan-Tropical Study of Stable Isotopes in Tree Rings [D]. Wageningen: Wageningen University, 2014.
- [3] 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.
- [4] Dietrich R, Bell F W, Silva L C R, Cecile A, Horwath W R, Anand M. Climatic sensitivity, water-use efficiency, and growth decline in boreal jack pine (*Pinus banksiana*) forests in Northern Ontario. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(10): 2761-2774.
- [5] Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Climate Change, 2015, 5(5): 424-430.
- [6] 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.
- [7] Shi S Y, Li J B, Shi J F, Zhao Y S, Huang G. Three centuries of winter temperature change on the southeastern Tibetan Plateau and its relationship with the Atlantic Multidecadal Oscillation. Climate Dynamics, 2017, 49(4): 1305-1319.
- [8] 赵志江, 谭留夷, 康东伟, 刘琪璟, 李俊清. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2012, 23(3): 603-609.
- [9] Dittmar C, Zech W, Elling W. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. Forest Ecology and Management, 2003, 173(1/3): 63-78.
- [10] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F, Zhu S D. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 306-313.
- [11] Affolter P, Büntgen U, Esper J, Rigling A, Weber P, Luterbacher J, Frank D. Inner alpine conifer response to 20th century drought swings. European Journal of Forest Research, 2010, 129(3): 289-298.
- [12] Li Z S, Liu G H, Fu B J, Hu C J, Luo S Z, Liu L X, He F. Anomalous temperature-growth response of *Abies faxoniana* to sustained freezing stress along elevational gradients in China's Western Sichuan Province. Trees, 2012, 26(4): 1373-1388.
- [13] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 2000, 403(6772): 853-858.
- [14] 吴祥定, 林振耀. 横断山区近代气候变化的研究. 地理研究, 1987, 6(2): 48-56.
- [15] 吴祥定, 林振耀. 云南小中甸地区树木年轮所表征的气候变化. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原研究 - 横断山考察专辑(一). 昆明: 云南人民出版社, 1983: 206-213.
- [16] 张卫国, 肖德荣, 田昆, 陈广磊, 和荣华, 张赞. 玉龙雪山 3 个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应. 生态学报, 2017, 37(11): 3796-3804.

- [17] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F. Annual temperature reconstruction in the central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 97-107.
- [18] Bi Y F, Xu J C, Gebrekirstos A, Guo L, Zhao M X, Liang E Y, Yang X F. Assessing drought variability since 1650 AD from tree-rings on the jade Dragon Snow Mountain, Southwest China. *International Journal of Climatology*, 2016, 35(14): 4057-4065.
- [19] Zhang Y, Yin D C, Sun M, Wang H, Tian K, Xiao D R, Zhang W G. Variations of climate-growth response of major conifers at upper distributional limits in Shika Snow Mountain, Northwestern Yunnan Plateau, China. *Forests*, 2017, 8(10): 377.
- [20] 吴普, 王丽丽, 邵雪梅. 采用高山松最大密度重建川西高原近百年夏季气温. *地理学报*, 2005, 60(6): 998-1006.
- [21] 《云南植被》编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987: 600-721.
- [22] Cook E R, Holmes R L. User's Manual for Program ARSTAN. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986: 302-302.
- [23] Körner C. Paradigm shift in plant growth control. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, 25: 107-114.
- [24] Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Morin H, Saracino A, Motta R, Borghetti M. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 301-310.
- [25] Yang B, He M H, Shishov V, Tychkov I, Vaganov E, Rossi S, Ljungqvist F C, Bräuning A, Griebinger 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.
- [26] Lyu L X, Deng X, Zhang Q B. Elevation pattern in growth coherency on the southeastern Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0163201.
- [27] Dai A G, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 1117-1130.
- [28] Gruber A, Strobl S, Veit B, Oberhuber W. Impact of drought on the temporal dynamics of wood formation in *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 2010, 30(4): 490-501.
- [29] Abe H, Nakai T, Utsumi Y, Kagawa A. Temporal water deficit and wood formation in *Cryptomeria japonica*. *Tree Physiology*, 2003, 23(12): 859-863.
- [30] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F. Tree-ring based drought reconstruction in the central Hengduan Mountains region (China) since A.D. 1655. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(14): 1879-1887.
- [31] Guo G A, Li Z S, Zhang Q B, Ma K P, Mu C L. Dendroclimatological studies of *Picea likiangensis* and *Tsuga dumosa* in Lijiang, China. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 435-441.
- [32] Fan Z X, Bräuning A, Yang B, Cao K F. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1/2): 1-11.
- [33] Pumijumnong N, Eckstein D. Reconstruction of pre-monsoon weather conditions in northwestern Thailand from the tree-ring widths of *Pinus merkusii* and *Pinus kesiya*. *Trees*, 2011, 25(1): 125-132.
- [34] Hughes M K. An improved reconstruction of summer temperature at Srinagar, Kashmir since 1660 AD, based on tree-ring width and maximum latewood density of *Abies pindrow* [Royle] Spach. *Palaeobotanist*, 2001, 50: 13-19.