

## 川西米亚罗林区主要树木生长对气候响应的差异\*

郭明明<sup>1</sup> 张远东<sup>1\*\*</sup> 王晓春<sup>2</sup> 刘世荣<sup>1</sup><sup>1</sup>中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所/国家林业局森林生态环境重点实验室,北京 100091; <sup>2</sup>东北林业大学生态研究中心,哈尔滨 150040)

**摘要** 为分析青藏高原东缘半湿润区不同树种树木生长对气候变化的响应规律,于川西米亚罗林区海拔 3000 m 左右(低海拔)采集铁杉、岷江冷杉、紫果云杉,海拔 4000 m 左右林线位置(高海拔)采集岷江冷杉、四川红杉,共计 182 棵树木年轮样芯,建立了不同树种的树轮宽度年表,对不同树种的年轮指数与各月气候因子进行相关分析.结果表明:在低海拔处,树木生长与 4、5 月气温呈负相关,与 4、5 月降雨呈正相关,受到春季干旱胁迫的影响;但树种之间存在显著差异:铁杉的生长受春季干旱胁迫影响最严重,岷江冷杉次之,紫果云杉所受影响很小.在高海拔处,树木生长主要受生长季温度的影响,岷江冷杉年轮指数与当年 2、7 月最低气温呈显著正相关,与上一年 10 月最高气温亦呈正相关;四川红杉年轮指数与 5 月最高气温呈显著正相关,但与 2 月均温、3 月最低气温呈显著负相关.近几十年青藏高原东北缘气候有干暖化趋势,如果这种趋势持续发生,低海拔紫果云杉长势将超过铁杉和岷江冷杉;高海拔处的升温更有利于岷江冷杉的生长.

**关键词** 年轮指数; 气候响应; 温度; 降水; 青藏高原

文章编号 1001-9332(2015)08-2237-07 中图分类号 S716.3, S791.1 文献标识码 A

**Difference in responses of major tree species growth to climate in the Miyaluo Mountains, western Sichuan, China.** GUO Ming-ming<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-dong<sup>1</sup>, WANG Xiao-chun<sup>2</sup>, LIU Shi-rong<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China*; <sup>2</sup>*Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(8): 2237-2243.

**Abstract:** To explore the responses of different tree species growth to climate change in the semi-humid region of the eastern Tibetan Plateau, we investigated climate-growth relationships of *Tsuga chinensis*, *Abies faxoniana*, *Picea purpurea* at an altitude of 3000 m (low altitude) and *A. faxoniana* and *Larix mastersiana* at an altitude of 4000 m (high altitude) using tree ring-width chronologies (total of 182 cores) developed from Miyaluo, western Sichuan, China. Five residual chronologies were developed from the cross-dated ring width series using the program ARSTAN, and the relationships between monthly climate variables and tree-ring index were analyzed. Results showed that the chronologies of trees at low altitudes were negatively correlated with air temperature but positively with precipitation in April and May. This indicated that drought stress limited tree growth at low altitude, but different tree species showed significant variations. *T. chinensis* was most severely affected by drought stress, followed by *A. faxoniana* and *P. purpurea*. Trees at high altitude were mainly affected by growing season temperature. Tree-ring index of *A. faxoniana* was positively correlated with monthly minimum temperature in February and July of the current year and monthly maximum temperature in October of the previous year. Radial growth of *L. mastersiana* was positively correlated with monthly maximum temperature in May, and negatively with monthly mean temperature in February and monthly minimum temperature in March. In recent decadal years, the climate in northeast Tibetan Plateau had a warming and drying trend. If this trend continues, we could deduce that *P. purpurea* should grow faster than *T. chinensis* and *A. faxoniana* at low altitudes, while *A. faxoniana* would benefit more from global warming at high altitudes.

**Key words:** tree-ring index; climate response; temperature; precipitation; Tibetan Plateau.

\* 国家自然科学基金项目(31370463)、林业公益性行业科研专项(201404201)和中央级公益性科研院所专项(CAFRIFEEP201411)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: zyd@caf.ac.cn

2014-10-08 收稿, 2015-03-19 接受。

青藏高原属于气候变化的敏感区,其陆地生态系统对气候变化的响应研究是全球变化研究的一个重点<sup>[1-3]</sup>。西南亚高山林区位于青藏高原东南缘,是我国第二大天然林区,研究该区主要树种对气候变化的响应,对预测气候变化背景下森林生产力及其固碳能力动态具有重要意义。

青藏高原东缘是我国树木年轮学研究的热点区域,邵雪梅等<sup>[4]</sup>对青海柴达木盆地东北缘宗务隆山和沙利克山祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)树轮研究发现,轮宽与5、6月降水呈正相关,与6月最高气温呈负相关,但6月的相对湿度与树轮之间的相关系数最大,说明研究区祁连圆柏的径向生长主要受水分条件控制;郑永宏等<sup>[5]</sup>对青海乌兰地区祁连圆柏林上限树轮样本进行气候响应分析发现,上限祁连圆柏生长主要受温度变化限制,与上年9、11月和当年2、7月的平均温度显著相关( $P < 0.05$ ),而与降水量之间不存在显著的相关关系;王亚军等<sup>[6]</sup>对祁连山中段青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮研究发现,不同高度的云杉树轮生长对春季降水极为敏感,呈显著正相关;对夏季气温的响应程度,各海拔却不相同,夏季气温对上、下限云杉生长有显著影响,但对于森林中部云杉作用并不明显,总体表现为负相关,夏季高温对树木生长不利。之前的研究多集中于青海等干旱半干旱地区,研究的树种较少,并且侧重于历史气候重建方面<sup>[4,7-9]</sup>。对半湿润地区主要树木生长响应研究较少。

川西米亚罗林区位于川西邛崃山区,属于半湿润地区,也是全球气候变化的潜在敏感地区,树种资源丰富,主要树种包括岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、紫果云杉(*P. purpurea*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)、四川红杉(*Larix mastersiana*)等。本文运用树木年轮学方法,开展该地区主要树种生长与气候关系的研究,深入分析各树种对气候变化的响应,探讨其差异和对未来气候的适应,并探索这些树种在历史气候重建中的应用,旨在为该区域生产力预测提供支持。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于川西米亚罗林区(31°24′—31°55′ N, 102°35′—103°4′ E, 图1),是青藏高原东缘褶皱带外缘部分,属于半湿润地区,具有典型的高山峡谷地貌,地形以石质山地为主,坡度多在35°以上,海拔2200~5500 m,原生森林分布于海拔2400~4200 m之间,以亚高山暗针叶林为主,主要树种有岷江冷

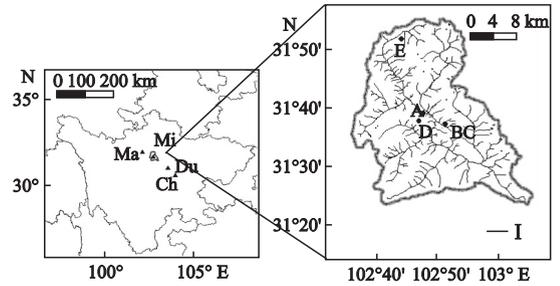


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of study area.

I: 河流 River; A: 低海拔铁杉 Low-altitude *Tsuga chinensis*; B: 低海拔岷江冷杉 Low-altitude *Abies faxoniana*; C: 低海拔紫果云杉 Low-altitude *Picea asperata*; D: 高海拔岷江冷杉 High-altitude *A. faxoniana*; E: 高海拔四川红杉 High-altitude *Larix mastersiana*. Mi: 米亚罗镇 Miyaluo County; Ma: 马尔康镇 Markang County; Du: 都江堰市 Dujiangyan City; Ch: 成都市 Chengdu City. 下同 The same below.

杉、紫果云杉、铁杉、四川红杉。其中,岷江冷杉和紫果云杉在海拔2800~4000 m的林线位置处均有分布,铁杉主要分布在海拔2500~2800 m位置处,而四川红杉只在林线位置处有分布。

受高原地形影响,该区属冬寒夏凉的高山气候。以海拔2760 m的米亚罗镇为例,全年降水量700~1400 mm,年蒸发量1000~1900 mm,1月均温-8℃,7月均温12.6℃,≥10℃年积温为1200~1400℃。

### 1.2 样品采集与年表建立

于川西米亚罗林区海拔3000 m左右(低海拔)采集铁杉、岷江冷杉、紫果云杉,海拔4000 m左右林线位置(高海拔)采集岷江冷杉、四川红杉。取样时,选择优势木,在胸高处垂直于山坡方向用生长锥钻取树芯,对于某些生长在悬崖及陡坡上的树木,限于采样环境条件,样芯的钻取高度和方向有所不同。将取到的样芯放入塑料管内,并进行编号。每株树木采集1个样芯,每树种至少采集30颗样芯,最终保留182根样芯(表1)。

表1 川西米亚罗林区不同树种的树轮采样点信息

Table 1 Information for tree-ring samples from different tree species in the Miyaluo Mountains, western Sichuan

样点及树种 Site and tree species	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	样芯数量 Core number
低海拔铁杉 Low-altitude <i>Tsuga chinensis</i>	102°48′	31°39′	2881	27
低海拔岷江冷杉 Low-altitude <i>Abies faxoniana</i>	102°51′	31°37′	3199	40
低海拔紫果云杉 Low-altitude <i>Picea asperata</i>	102°51′	31°37′	3179	45
高海拔岷江冷杉 High-altitude <i>Abies faxoniana</i>	102°47′	31°39′	3864	40
高海拔四川红杉 High-altitude <i>Larix mastersiana</i>	102°44′	31°52′	3809	30

将所采样芯带回实验室, 样品预处理按照 Stokes 等<sup>[10]</sup>的方法进行. 经晾干、固定、打磨后, 在双筒显微镜下用骨架图法进行目视交叉定年. 使用 Lintab 6 年轮测量仪在 0.01 mm 精度下测量轮宽, 使用 COFECHA 程序检验定年和测量结果, 手动消除定年和宽度测量过程中出现的误差<sup>[11]</sup>. 经过交叉定年的年轮序列, 利用 ARSTAN 程序进行去趋势和标准化, 去趋势方法采用负指数和线性函数进行, 以保留更多的低频变化趋势, 降低因年龄生长速率不同而带来的影响<sup>[12]</sup>. 用双权重平均法进行年轮曲线的标准化, 最终建立低海拔铁杉、低海拔岷江冷杉、低海拔紫果云杉及高海拔岷江冷杉、高海拔四川红杉的年表. 从年表统计特征可知, 差值年表的各项统计特征普遍高于标准年表, 例如: 高海拔岷江冷杉差值年表中, 信噪比为 20.31, 大于标准年表中的 12.67; 差值年表中的样本代表性为 0.95, 大于标准年表中的 0.93, 因此本文采用差值年表进行分析.

### 1.3 气象资料与数据分析

米亚罗林区缺乏长期的气象数据, 临近台站有理县站 (31°26' N, 103°10' E, 1880 m)、马尔康站 (31°54' N, 102°14' E, 2664 m)、都江堰站 (31°00' N, 103°40' E, 699 m). 由于临近气象站间气温具有较高的相关性, 空间异质性主要表现在降水方面. 马雪华<sup>[13]</sup>对 1956—1960 年米亚罗降水量进行连续测定, 与同时期马尔康、都江堰气象站的月平均降水量进行对比 (图 2), 可以发现米亚罗降水趋势与马尔康相近, 即存在 2 个降水高峰, 分别为 5—6 月的最

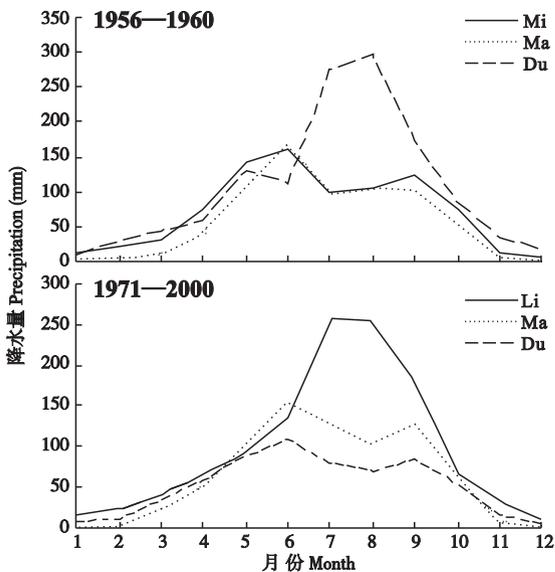


图 2 各气象站月平均降水量

Fig.2 Monthly mean precipitation at different stations.

Li: 理县 Lixian County.

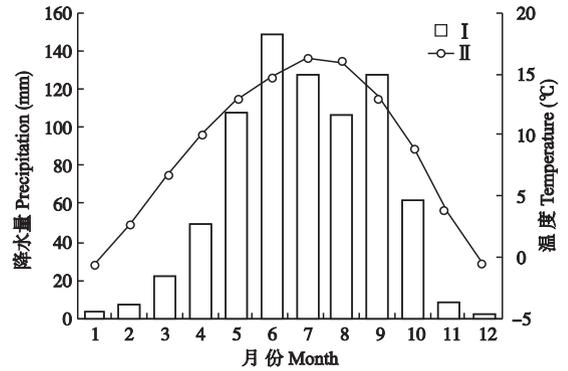


图 3 川西马尔康气象站月平均气温与总降水量的变化

Fig.3 Monthly mean temperature and total precipitation at Markang weather station (1955—2011), western Sichuan.

I: 降水量 Precipitation; II: 气温 Temperature.

高峰和 9 月的次高峰, 而与都江堰单峰降水曲线相差较远. 对比 1971—2000 年理县、马尔康、都江堰三站月平均降水量 (图 2), 发现理县降水趋势也呈双峰形, 但月平均降水量明显低于马尔康. 另外, 对比 3 个气象站与米亚罗镇海拔高度, 发现马尔康气象站与米亚罗镇 (即采样点) 的垂直距离最近. 因此, 本研究中气候资料选用国家气象局 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 提供的川西马尔康站 1955—2011 年的气候数据 (图 3). 本研究中主要利用月平均气温、月最高气温、月最低气温、月降水量 4 项气象指标, 分析时间跨度为前一年 9 月到当年 9 月. 年表与气候要素之间的相关分析用 SPSS 19.0 软件计算 ( $\alpha=0.05$ ).

## 2 结果与分析

### 2.1 年表及年表特征

通过 5 个差值年表公共区间 (1848—2011 年) 的相关系数 (表 2) 可以看出, 年表间具有较高的一

表 2 川西米亚罗林区不同树木差值年表间相关系数

Table 2 Correlation coefficients of residual chronologies for different tree species at in the Miyalu Mountains, western Sichuan (1848—2011)

	低海拔 铁杉 Low- altitude <i>Tsuga</i> <i>chinensis</i>	低海拔 岷江冷杉 Low- altitude <i>Abies</i> <i>faxoniana</i>	低海拔 紫果云杉 Low- altitude <i>Picea</i> <i>asperata</i>	高海拔 岷江冷杉 High- altitude <i>Abies</i> <i>faxoniana</i>
低海拔岷江冷杉 Low-altitude <i>Abies faxoniana</i>	0.249 **			
低海拔紫果云杉 Low-altitude <i>Picea asperata</i>	0.192 *	0.366 **		
高海拔岷江冷杉 High-altitude <i>Abies faxoniana</i>	0.160 *	0.213 **	0.127	
高海拔四川红杉 High-altitude <i>Larix mastersiana</i>	-0.109	-0.052	0.187 *	0.096

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

致性,但也存在差异.低海拔岷江冷杉与低海拔紫果云杉年表相关系数最高(0.366),这可能是由于2个采样点空间距离最近,气候限制因子较一致.高海拔

岷江冷杉与四川红杉差值年表相关系数仅为0.096,这可能和树种的生理特性有关.当然,由于坡度、坡向、海拔高度等引起的水热状况的差异在一定程度上造成了年表对气候变化响应特征的不同.由图4可以看出,低海拔3个树种年表整体变化趋势基本

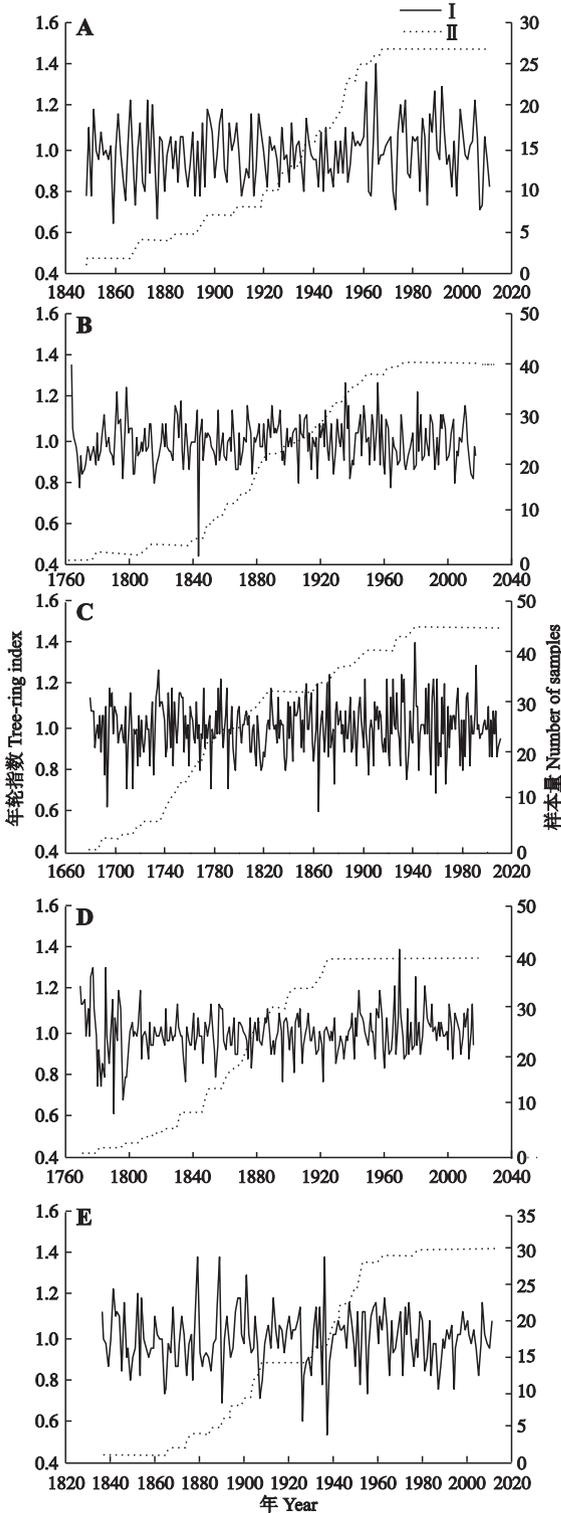


图4 川西米亚罗林区5个采样点不同树种的年轮指数  
Fig.1 Tree-ring index of different tree species at five sampling sites in the Miyaluo Mountains, western Sichuan.

I: 年轮指数 Tree-ring index; II: 样本量 Number of samples.

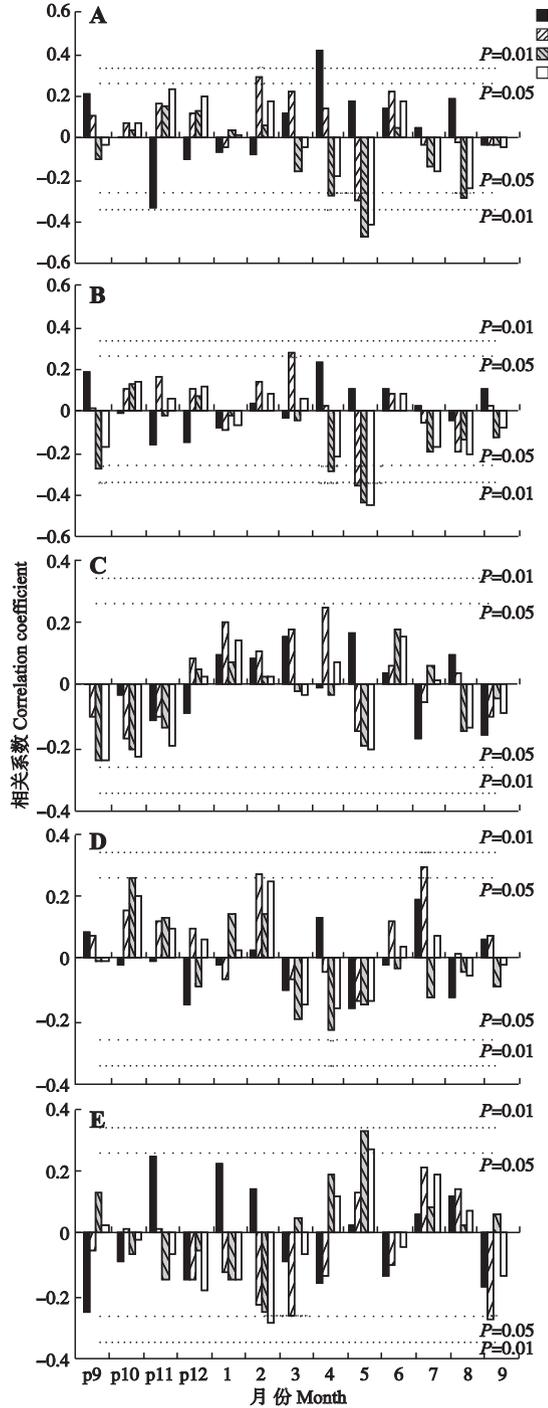


图5 不同树种年表与月气候数据的相关系数  
Fig.5 Correlation coefficients between monthly climatic data and different tree species (1955–2011).

I: 降水量 Precipitation; II: 最低温度 Minimum temperature; III: 最高温度 Maximum temperature; IV: 均温 Mean temperature. p: 前一年 Previous year.

表 3 川西米亚罗林区不同树种差值年表的主要统计特征

Table 3 Major statistic characteristics for residual chronologies of different tree species in the Miyaluo Mountains, western Sichuan

项目 Item	序列长度 Time span	平均敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation	平均相关系数 Mean correlation coefficient	信噪比 Signal to noise ratio	样本总体代表性 Expressed population signal	第一特征根方 差解释量 Variance in first eigenvector (%)
低海拔铁杉 Low-altitude <i>Tsuga chinensis</i>	1848—2011	0.18	0.14	0.26	7.70	0.89	31.2
低海拔岷江冷杉 Low-altitude <i>Abies faxoniana</i>	1763—2011	0.12	0.11	0.26	11.40	0.92	29.4
低海拔紫果云杉 Low-altitude <i>Picea asperata</i>	1679—2011	0.15	0.13	0.29	12.86	0.93	31.5
高海拔岷江冷杉 High-altitude <i>Abies faxoniana</i>	1768—2011	0.10	0.11	0.37	20.31	0.95	39.7
高海拔四川红杉 High-altitude <i>Larix mastersiana</i>	1836—2011	0.15	0.14	0.36	15.93	0.94	40.2

相似,但局部有不同之处,如铁杉 1940 年之后略有下降,而岷江冷杉、紫果云杉微微上升;高海拔地区岷江冷杉年轮指数波动平缓,而四川红杉年轮指数变动相对较大,尤其在 1880—1890、1930—1940 年波动差异明显。

由表 3 可知,在米亚罗地区所取得的 5 个差值年表中,高海拔岷江冷杉及高海拔四川红杉拥有较高的平均相关系数、信噪比及样本代表性,年表质量相对较好,表明高海拔区树轮序列包含较多的气候信息。低海拔铁杉及低海拔紫果云杉平均敏感度较高,表明这两个种的差值序列包含较多的高频变化信息。低海拔岷江冷杉及铁杉年表的信噪比及样本代表性相对较低,年表质量相对较差。总体来说,5 个年表都达到了年轮气候分析的要求,适合进行年轮气候分析。

## 2.2 径向生长与月气候数据的相关性

从图 5 可以看出,低海拔铁杉径向生长主要与 4、5 月降水量呈正相关,与温度呈负相关。具体体现在与 4 月降水量呈显著正相关,与 4 月最高气温呈显著负相关;与 5 月均温、最高气温和最低气温呈显著负相关。低海拔岷江冷杉径向生长与 4 月最高气温呈显著负相关,与 5 月均温、最低气温及最高气温均达到显著负相关,与 4 月降水量存在正相关趋势,但未达到显著水平。低海拔紫果云杉径向生长受各月温度、降雨影响不大,虽与 5 月气温呈负相关趋势,与 5 月降水呈正相关趋势,但均未达到显著水平。高海拔岷江冷杉径向生长与当年 2、7 月最低气温以及上一年 10 月最高气温呈显著正相关。高海拔四川红杉生长与 5 月均温、最高气温达到显著正相关,与 2 月均温、3 月最低气温呈显著负相关。

## 3 讨 论

寒冷地区树木生长与温度的关系一般表现为正响应,温度升高、生长加快;而与温度呈负相关并伴

随着与降水量呈正相关,则认为受到干旱胁迫的影响<sup>[4,14-16]</sup>。本研究中,在低海拔(3000 m 附近),树木生长与春季降雨量呈正相关,与春末夏初温度呈负相关,表明生长季初期干旱对低海拔树木生长存在显著影响。值得注意的是,不同树种受春季干旱影响程度不同:铁杉对水分的要求最敏感,受干旱胁迫最严重;岷江冷杉次之;紫果云杉则表现出较强的耐旱性,受春季干旱影响较小。目前,青藏高原正成为全球气候变化的敏感区,气候有干暖化趋势。在过去的 30 年里,亚高山森林带(2600~3600 m)升温速率为  $0.19\sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ <sup>[1,17]</sup>;降水减少速率为  $23.5\sim 28.6\text{ mm}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ <sup>[18]</sup>。如果未来气候继续干暖化,铁杉、岷江冷杉持续受春季干旱胁迫,生长都将受到严重影响,尤其是铁杉,其竞争力与其他几个树种相比将下降,并进一步导致生产力的降低,而紫果云杉受干旱胁迫较小,其竞争力、生产力可能会逐渐超过铁杉和岷江冷杉。

在高海拔林线位置处,树木受降水影响较小,温度成为树木径向生长的主要限制性气候因子<sup>[19-26]</sup>,年轮宽度与生长季前期及生长季(5 和 7 月)温度呈明显的正效应。这是由于树木的光合作用主要受温度调控,生长季内的低温减少了高山和亚高山地区植物的光合产量。两树种对上一年 10 月及当年 2、3 月的响应存在显著差异,高海拔岷江冷杉生长与上一年 10 月温度及当年 2 月温度呈正相关,尤其是与 2 月最低气温达到显著正相关;而四川红杉生长与当年 2 月均温、3 月最低气温呈显著负相关。温暖的 10 月极有可能促进岷江冷杉积累有机物,以供来年生长季生长<sup>[27-29]</sup>;2、3 月时呼吸作用占主导地位,温度愈高,呼吸作用消耗的养分和水分愈多,造成冬末春初温度与四川红杉生长呈负相关<sup>[30]</sup>。由此可推断,在高海拔林线处,升温可能更有利于岷江冷杉的生长。值得注意的是,与针叶树种不同,Liang 等<sup>[31]</sup>发现,在喜马拉雅山中部,随海拔升高,降水逐渐减

少,林线处桦木径向生长主要受生长季前降水的影响。随着未来气候继续干暖化,西南林区林线处针叶树种是否受到降水影响有待进一步研究。

#### 4 结 论

整体说来,研究区5个样点树木年轮清晰,便于定年及测量,5个差值年表显示了较高的平均敏感度、平均相关系数、信噪比及样本总体代表性,包含丰富的环境和气候信息。对不同树种的年轮指数与各月气候因子的相关性分析得到以下结论:低海拔树木生长受到春季降雨与温度的共同作用,表现出不同程度的干旱胁迫,铁杉生长受影响最严重,岷江冷杉次之,紫果云杉生长受影响较小,未来气候继续干暖化,紫果云杉竞争力可能会超过岷江冷杉和铁杉;高海拔两树种生长主要受温度控制,对生长季前期及生长季温度(5和7月)响应较一致,但是对2、3月温度响应存在显著差异,升温可能更有利于岷江冷杉的生长。

#### 参考文献

- [1] Yao T-D (姚檀栋), Liu X-D (刘晓东), Wang N-L (王宇练). The ranges of climate change in the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45**(1): 98-106 (in Chinese)
- [2] Yang Y-H (杨元合), Piao S-L (朴世龙). Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(1): 1-8 (in Chinese)
- [3] Xu X-K (徐兴奎), Chen H (陈红). The temporal and spatial variation in vegetation cover and genesis analysis in the Tibetan Plateau under the global warming background. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2008, **53**(4): 456-462 (in Chinese)
- [4] Shao X-M (邵雪梅), Huang L (黄磊), Liu H-B (刘洪滨), et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China Series D* (中国科学D辑), 2004, **34**(2): 145-153 (in Chinese)
- [5] Zheng Y-H (郑永宏), Liang E-Y (梁尔源), Zhu H-F (朱海峰), et al. Response of radial growth of Qilian juniper to climatic change under different habitats. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2008, **30**(3): 7-12 (in Chinese)
- [6] Wang Y-J (王亚军), Chen F-H (陈发虎), Gou X-H (勾晓华), et al. Study on response relationship between tree-ring and climate factors and climate reconstruction in middle region of Qilishan Mountains. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2001, **21**(2): 135-140 (in Chinese)
- [7] Zhang QB, Cheng GD, Yao TD, et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**: 1739-1742
- [8] Huang L (黄磊), Shao X-M (邵雪梅), Liang E-Y (梁尔源), et al. Characteristics of millennial tree-ring width variations of Qilian juniper in Shalike Mountain, Qinghai. *Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(3): 365-373 (in Chinese)
- [9] Wu X-D (吴祥定), Sun L (孙力), Cheng Z-G (程志刚). Foundation of some tree ring chronologies in Tibet. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1988, **33**(8): 616-619 (in Chinese)
- [10] Stokes MA, Smiley TL. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968
- [11] Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 1983, **43**: 69-78
- [12] Cook ER, Holmes RL. *User's Manual for Program ARSTAN*. Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986
- [13] Ma X-H (马雪华). The deforestation and soil and water conservation of alpine dark coniferous forest in western Sichuan, China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1963, **8**(2): 149-158 (in Chinese)
- [14] Fritts HC, Smith DG, Stokes MA. The biological model for paleoclimatic interpretation of Mesa Verde tree-ring series. *American Antiquity*, 1965, **31**: 101-121
- [15] Zhang Z-H (张志华), Wu X-D (吴祥定), Li J (李骥). Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 300-year drought days in eastern Tianshan Mountains. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 1996, **7**(1): 53-60 (in Chinese)
- [16] Wu P (吴普), Wang L-L (王丽丽), Huang L (黄磊). A preliminary study on the tree ring sensitivity to climate change of five endemic conifer species in China. *Geographical Research* (地理研究), 2006, **25**(1): 43-52 (in Chinese)
- [17] Liu X-D (刘晓东), Hou P (侯萍). Relationship between the climatic warming over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas in recent 30 years and the elevation. *Plateau Meteorology* (高原气象), 1998, **17**(3): 245-249 (in Chinese)
- [18] Lyu X-R (吕晓蓉), Lyu X-Y (吕晓英). Climate tendency analysis of warming and drying in grassland of Northeast Qingzang Plateau of China. *Grassland of China* (中国草地), 2000, **24**(4): 8-13 (in Chinese)
- [19] Kmer C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 2004, **31**: 713-732
- [20] Shao X-M (邵雪梅), Fan J-M (范金梅). Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of dragon spruce. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 1999, **19**(1): 81-89 (in Chinese)
- [21] Li Z-S (李宗善), Liu G-H (刘国华), Zhang Q-B (张齐兵), et al. Tree ring reconstruction of summer temperature variations over the past 159 years in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China. *Chi-*

- nese *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(6): 628–641 (in Chinese)
- [22] Wu X-D (吴祥定). *Tree Ring and Climate Change*. Beijing: China Meteorology Press, 1990 (in Chinese)
- [23] Liu LS, Shao XM, Liang EY. 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**: 278–285
- [24] Liang EY, Shao XM, Echstein D, *et al.* 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**: 268–277
- [25] Liang EY, Shao XM, Xu Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, **98**: 9–18
- [26] Zhu HF, Shao XM, Yin ZY, *et al.* August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, **305**: 84–92
- [27] Julian LH. Effect of daily minimum temperature on photosynthesis in eastern Hemlock (*Tsuga canadensis* L.) in autumn and winter, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2000, **32**: 368–374
- [28] Schaberg IG, Snyder MC, Shane JB, *et al.* Seasonal patterns of carbohydrate reserves in red spruce seedlings. *Tree Physiology*, 2000, **20**: 549–555
- [29] Chabot BF, Hicks DJ. The ecology of leaf life spans. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, **13**: 229–259
- [30] Wu X-D (吴祥定), Shao X-M (邵雪梅). A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1996, **51**(1): 92–101 (in Chinese)
- [31] Liang E, Dawadi B, Pederson N, *et al.* Is the growth of birch at the upper timberline in the Himalayas limited by moisture or by temperature? *Ecology*, 2014, **95**: 2453–2465

---

**作者简介** 郭明明,女,1988年生,硕士研究生.主要从事生态学与气候变化森林响应研究. E-mail: guomingming901@163.com

**责任编辑** 杨 弘

---