

DOI: 10.5846/stxb201404140715

郭明明, 张远东, 王晓春, 黄泉, 杨素香, 刘世荣. 升温突变对川西马尔康树木生长的影响. 生态学报, 2015, 35(22): - .

Guo M M, Zhang Y D, Wang X C, Huang Q, Yang S X, Liu S R. Heterogeneous responses of main conifer tree rings to the abrupt warming around 1995 in Markang, Sichuan, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

升温突变对川西马尔康树木生长的影响

郭明明¹, 张远东^{1,*}, 王晓春², 黄泉³, 杨素香⁴, 刘世荣¹

1 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

2 东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

3 四川省阿坝州科学技术研究院林业科学技术研究所, 汶川县 623000

4 四川省阿坝州理县林业局薛城林业工作站, 理县 623104

摘要: 本文以采自川西马尔康林区的岷江冷杉(*Abies faxoniana*)和岷江柏(*Cupressus chengiana*)树轮为研究对象, 对树轮指数与气候要素进行相关分析, 研究 1995 年升温突变前后该区主要针叶树种的树轮响应变化。结果显示: 1955—1994 年时段, 高、中海拔岷江冷杉径向生长对温度正响应, 年轮指数呈缓慢的上升趋势, 低海拔岷江柏受温度影响不大, 年轮指数上升较快; 1995—2012 年时段, 随着温度升高, 三样点树木年轮指数并未上升, 甚至呈下降趋势, 表现出“响应分异现象”。对月气候要素的响应, 树种间存在差异: 高海拔岷江冷杉在前一时段主要表现为与冬季温度的正相关, 后一阶段则转变为与 4 月温度的显著负相关及与 4 月份降水的显著正相关, 受到显著的 4 月干旱胁迫影响; 中海拔岷江冷杉后一时段温度敏感性消失, 5 月干旱胁迫加剧; 低海拔岷江柏主要受降水影响, 后一时段 4 月份干旱胁迫加剧。升温突变后, 川西马尔康林区岷江冷杉和岷江柏均表现出“响应分异现象”, 在今后的气候重建及碳循环模拟中应加以考虑。

关键词: 响应分异; 干旱胁迫; 树木年轮; 升温突变; 川西地区

Heterogeneous responses of main conifer tree rings to the abrupt warming around 1995 in Markang, Sichuan, China

GUO Mingming¹, ZHANG Yuandong^{1,*}, WANG Xiaochun², HUANG Quan³, YANG Suxiang⁴, LIU Shirong¹

1 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

2 Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3 Institute of Forestry Technology, A' Ba Academy of Forestry, Sichuan, Wenchuan 623000, China

4 Forestry workstation of Xuecheng, Lixian Forestry Bureau, Sichuan, Lixian 623104, China

Abstract: Temperature is considered to have the greatest influence on annual tree growth in cold regions, resulting in a pronounced positive relationship. However, an anomalous reduction or even loss of temperature sensitivity and/or a divergence in tree growth has been detected at previously temperature-limited northern sites in recent decades. This phenomenon, known as the “divergence problem,” has potentially significant implications for large-scale patterns of forest growth, the development of regional climate reconstruction, and carbon cycle models based on tree-ring records. The main objective of this study was to explore the responses of the main conifer species (*Abies faxoniana* and *Cupressus chengiana*) to abrupt warming around 1995 in Markang County of western Sichuan, and determined whether the “divergence problem” exists in this typical high-elevation cold region. We analyzed the climate-growth relationships of the conifer species in two

基金项目: 国家自然科学基金(31370463); 国家科技支撑课题(2012BAD22B01); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0810)

收稿日期: 2014-04-14; **网络出版日期:** 2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyd@caf.ac.cn

distinct periods: 1955—1994 and 1995—2012. The results showed that the growth of *A. faxoniana* at middle- and high-altitude sites had a positive temperature response in 1955—1994 and the tree-ring index was relatively high in this period, whereas *C. chengiana* at the low-altitude site was marginally influenced by temperature in 1955—1994 and the tree-ring index was apparently high at this period. In contrast, the value of the three tree ring chronologies along the elevational gradient remained steady or decreased in 1995—2012. This “growth divergence” found in this study is expressed as an offset between warm instrumental temperatures and their underestimation based on tree rings. The ring width index of *A. faxoniana* at high-altitude site was positively correlated with winter temperature prior to 1995, while it was significantly negatively correlated with April temperature and significantly positively correlated with April precipitation after 1995. This indicated the potential existence of spring drought stress at the high-elevation site. The temperature sensitivity of *A. faxoniana* at the middle-altitude site disappeared in 1995—2012, accompanied by the intensification of the effect of spring drought stress on radial growth of trees. The growth of *C. chengiana* at the low-altitude site was mainly controlled by precipitation, and the spring drought stress on forest growth became a noticeable feature after 1995. Conifer forests are the most productive and widespread forest types in the west Sichuan region. Thus, any coherent, climate-related change in conifer forest growth is likely to be an important factor in CO₂ uptake. Since the conifer species in Markang County of west Sichuan exhibited “growth divergence” with the abrupt warming after 1995, the current assumption of tree-growth and climate models of a uniform positive relationship of forest growth to high-elevation warming will lead to potential uncertainty in estimating the regional climate change and carbon cycle of west Sichuan.

Key Words: divergence phenomenon; drought stress; tree-ring; abrupt warming; western Sichuan

一般认为,温度是寒冷区域树木生长的主要限制因子,寒区树木生长与温度呈正相关,全球气候变暖将促进这些区域的树木生长,增加区域碳吸储能力^[1-2]。然而近期研究表明,近数十年来在温度作为主要生长限制因子的环北极地区,一些树木径向生长的温度敏感性下降或丧失^[3-10],甚至由正相关转为负相关^[11-12]。另外,生长在同一地点内具有相同生长趋势的树木在近数十年内出现生长分异^[13]。这两类现象被称之为树轮研究中的“响应分异现象”(Divergence Phenomenon)^[14]。“响应分异现象”的存在,挑战了以往对气候变暖条件下寒冷区森林生长和生产力动态的预测。“响应分异现象”也对树轮气候学研究中一个重要的前提假设“均一性原理”提出了质疑,基于树木年轮数据的气候序列重建的可靠性必须重新评估^[14-16]。关于分异现象形成的原因和机制解释已有很多,升温诱导的干旱胁迫被认为是引起响应分异的重要因素^[3,6,10,17]。在阿尔卑斯高山区,挪威云杉(*Picea abies*)树轮与温度和降水的关系不稳定,20 世纪的温度敏感性下降、降水敏感性增加^[10]。同时,树种间的温度响应差异显著,欧洲落叶松(*Larix decidua*)树轮宽度与温度的相关性及其时间稳定性要高于挪威云杉^[18]。在环北极地区,与其他树种相比,挪威云杉、白云杉(*Picea glauca*)、黑云杉(*Picea mariana*)和西伯利亚云杉(*Picea obovata*)等云杉属树种响应分异现象最为显著^[19]。这些研究表明,响应分异现象与研究区域、树种均有很大关系。

目前,关于响应分异的研究主要集中在北半球高纬度地区^[19-24],中低纬度研究较少。Büntgen 在地中海地区的研究发现,树轮密度对夏季温度的敏感性一直很好,但轮宽对温度的响应却表现出时空不稳定性^[25]; Yonenobu 等发现日本扁柏(*Hinoki cypress*)树轮宽度在 1962 年以后对温度的敏感性降低^[26]; Shi 等在青藏高原东北部三江源区的研究也发现了树木生长对气候响应随时间变化的不稳定性^[27]; Zhang 等对中国祁连山、贺兰山 3 个不同树种(油松 *Pinus tabulaeformis*, 青海云杉 *Picea crassifolia*, 和祁连圆柏 *Sabina przewalskii*)的研究发现,油松和祁连圆柏发生了生长分异,而青海云杉没有^[28]。“响应分异现象”表明我们至今对树木生长与气候之间的关系缺乏深刻的了解,开展这方面的研究对于森林生长和生产力模拟、区域碳循环和树轮气候重建都具有重要意义^[14-29]。

西南高山林区位于青藏高原东缘,纵跨中低纬度地带,高山森林广布,主要树种包括岷江冷杉(*Abies*

faxoniana)、和岷江柏(*Cupressus chengiana*)等。该区是我国第二大天然林区,是我国最重要的生物碳库之一,树木生长和生产力动态对我国未来碳吸储能力有重要影响^[30]。同时该区基于树轮的气候重建在我国历史气候研究中占有重要地位^[31-37]。青藏高原作为全球气候变化最为敏感的地区之一,近 45 年来年均温已上升 1.3 °C 以上^[38];丁一汇,张莉分别用滑动 t 检验、Yamamoto 法和 Mann-Kendall 三种检验方法,对青藏高原地区地表气温进行突变检测发现,青藏高原地区于 80 年代中期出现变暖信号,但之后有降温现象,直到 90 年代中期左右才开始进入显著快速增暖期,增温突变发生在 1995 年左右^[39]。吕少宁等亦研究发现,1980 年代后高原地区温度的周期变化普遍发生了调整,自 1990 年代初期后气温持续升高,前期的显著周期已经不再显著^[40]。升温突变之后,西南高山林区主要树种是否存在树轮对温度响应的分异现象?若存在,产生分异的原因是什么?树种间有何差异?这对西南高山林区生产力预测及气候重建至关重要。本文以川西马尔康林区为例,尝试对这些问题进行深入分析。

1 研究区域概况与研究方法

1.1 研究区域概况

川西马尔康林区(30°35′—32°24′N, 101°17′—102°41′E)地处青藏高原东缘邛崃山脉北段西侧、大渡河上游支流梭磨河两岸,具有典型的高山峡谷地貌,属西南高山林区二级分区之岷江冷杉林区。气候受着高原地形的决定性影响,属冬寒夏凉的高山气候。以海拔 2665 m 的马尔康镇为例,年均气温 8—9 °C,年降雨量 750 mm 左右(图 1),日照达 1500 h 以上,绝对无霜期 120 d 左右。马尔康林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而分异^[41]。原生森林分布于海拔 2400—4000 m 之间,以亚高山暗针叶林为主,优势树种为岷江冷杉。岷江柏为我国珍稀濒危保护植物,在马尔康松岗、白湾一带沟谷(2400 m)以上至 2800 m 范围内成片分布,形成岷江柏林,并建立了岷江柏自然保护区。

1.2 样品采集与年表建立

由于 20 世纪 60 年代至 80 年代的大规模开发,低海拔暗针叶林基本采伐殆尽。本次研究采集了高海拔阴坡林线附近的岷江冷杉、中海拔保留带上的岷江冷杉,以及低海拔岷江柏(图 2)。在 3 个位点选择优势木,在胸高处垂直于山坡方向上用生长锥钻取树芯。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,每个树种至少采集 30 颗样芯。样本带回实验室后,剔除断裂或未钻取到髓芯等不适合本研究的部分样芯,最后共保留 107 根实验样芯,并全部交叉定年(表 1)。

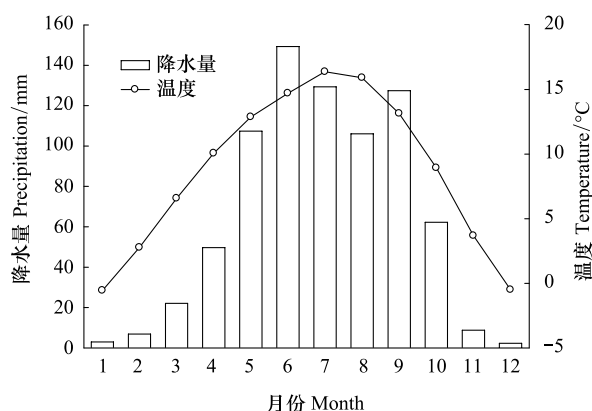


图 1 川西马尔康气象站月平均气温与总降水量的变化(1955—2012 年)

Fig. 1 Monthly mean temperature and total precipitation at Markang, western Sichuan (1955—2012)

表 1 川西马尔康林区不同树种的树轮采样点信息

Table 1 Information for different tree species at Markang, western Sichuan

样点及树种 Sites and tree species	经度 Longitude /E	纬度 Latitude /N	海拔 Elevation /m	样芯数量 Core numbers
高海拔岷江冷杉 High-altitude <i>Abies faxoniana</i>	102°17′	31°43′	3967	34
中海拔岷江冷杉 Middle-altitude <i>Abies faxoniana</i>	102°16′	31°45′	3405	35
低海拔岷江柏 Low-altitude <i>Cupressus chengiana</i>	102°02′	31°54′	2456	38

将所采样芯带回实验室,样品预处理按照 Stokes& Smiley^[42]阐述的方法进行。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 年轮测量仪测量轮宽,使用 COFECHA 程序检验定年和

测量结果^[43],手动消除定年和宽度测量过程中出现的误差。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^[44],去趋势方法采用负指数或线性函数进行,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。用双权重平均法进行年轮曲线的标准化,最终建立标准、残差和自回归年表。从年表统计特征可知,差值年表具有较高质量,因此选用差值年表进行年轮气候响应分析。

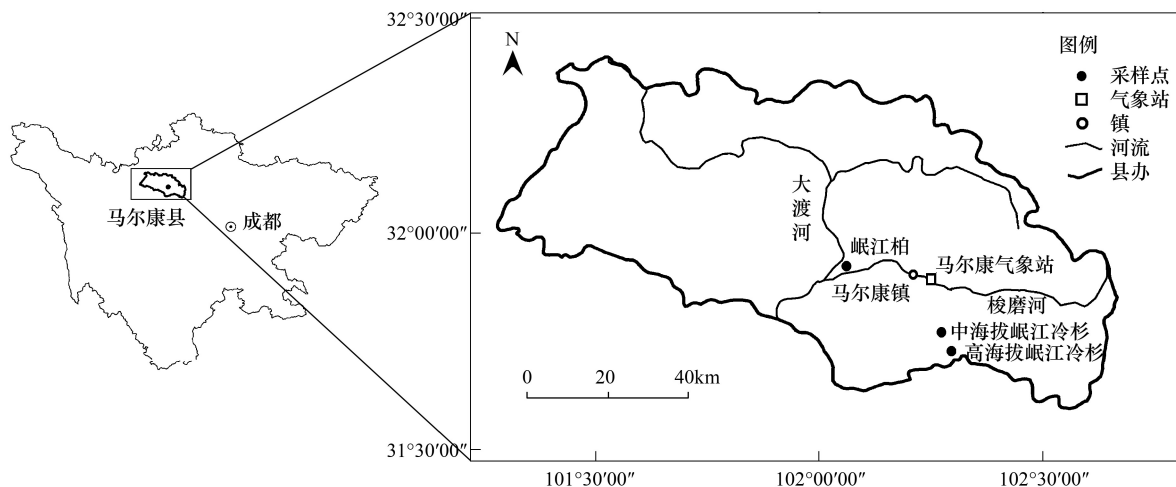


图 2 采样点及气象站分布

Fig. 2 Distribution of tree-ring sampling sites and meteorological station

1.3 气象资料与数据分析

本研究的气象数据选取离采样地点最近的马尔康气象站(国家标准气象台站,31°54'N,102°14'E,海拔2664 m),气候资料气象数据由国家气象局(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供,区间为1954—2012年,经检验确认,该站的气象数据可靠,气象资料变化相对均一。气候要素包括月平均气温(T_{mean})、月均最高温(T_{max})、月均最低温(T_{min})、月总降水量(P),与年轮指数的分析区间为前一年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 软件来计算。

青藏高原气温在20世纪80年代中期开始变暖,90年代中期发生显著增暖的突变^[28-33]。马尔康年均温也在90年代中期以后快速升高(图3),因此本研究以1995年为分界点,在1955—1994年时段和1995—2012年时段进行树轮指数与气候要素的相关分析。

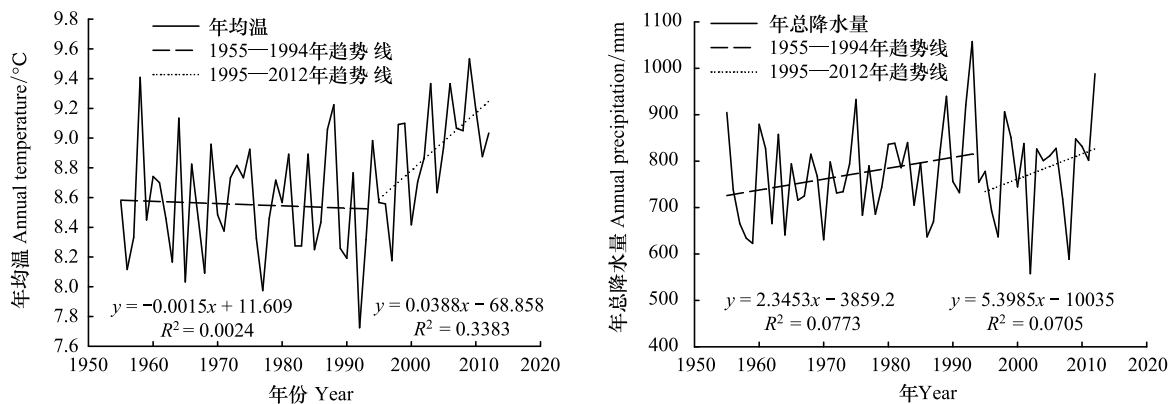


图 3 升温突变前后马尔康年均温与年降水量的变化

Fig. 3 The trends of annual mean temperature and annual precipitation before and after warming abrupt change

从年表特征值来看(表2),低海拔岷江柏平均敏感度、标准差均最高,高海拔岷江冷杉年表的信噪比及样本代表性最高,表明二者差值年表含有的气候信息较多,年表质量较好;中海拔岷江冷杉年表平均敏感度也较

高,但是信噪比和样本代表性相对较低,年表质量相对较差。总体说来,3 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。

表 2 川西马尔康林区不同树种的差值年表特征值
Table 2 Major statistic characteristics for residual chronologies of different tree species at Markang, western Sichuan

特征指标 Statistic characteristics	高海拔岷江冷杉 High-altitude <i>Abies faxoniana</i>	中海拔岷江冷杉 Middle-altitude <i>Abies faxoniana</i>	低海拔岷江柏 Low-altitude <i>Cupressus chengiana</i>
序列长度 Time span	1714—2012	1791—2012	1693—2012
平均敏感度 Mean sensitivity	0.13	0.15	0.26
标准差 Standard deviation	0.11	0.14	0.22
平均相关系数 Mean correlation coefficient	0.38	0.23	0.28
信噪比 Signal-to-noise ratio	17.26	7.05	12.73
样本代表性 Expressed population signal	0.95	0.88	0.93
第一主成分方差解释量 Variance in first eigenvector /%	40.63%	27.07%	30.88%

2 结果分析

2.1 年表及年表特征

岷江冷杉在两个海拔的变化相近,窄轮和宽轮出现年份较一致。低海拔岷江柏年表波动较大,与岷江冷杉 2 个年表明显不同(图 4)。

2.2 温度突变前后年均温及年轮指数变化趋势

从升温突变前后三样点树木年轮指数与年均温的变化趋势来看(图 5),1955—1994 年时段,温度指标波动平缓,高、中海拔岷江冷杉对温度响应较好,年轮指数呈缓慢的上升趋势,低海拔岷江柏年轮指数波动较大,整体呈较快的上升趋势;1995—2012 年时段,随着温度显著快速上升,三样点树木均未表现出相应的生长加速,岷江冷杉甚至出现生长下降的趋势,树轮指标与温度指标出现了明显的分离现象。

2.3 温度突变前后树轮响应变化

高海拔岷江冷杉年轮指数在 1955—1994 时段内除春季(3、4、5 月)外,多与其他各月温度呈正相关关系,尤其是与上一年 11 月三个温度指标达到显著或极显著水平(图 6);但在 1995—2012 年时段内与这些月份温度的正相关性消失,转为与上一年 12 月最高温的显著负相关;在春季,则与温度的负相关性增加,尤其与 4 月最高温显著负相关,并与后一时段 4 月降水显著正相关。这表明,在升温突变后,高海拔岷江冷杉受 4 月干旱影响明显加剧(图 6)。

图 7 可知,中海拔岷江冷杉年轮指数在 1955—1994 时段内与前一年 11 月、12 月温度、当年 2 月温度多项指标呈显著正相关,但在后一时段内转为普遍的负相关关系;另外,中海拔岷江冷杉径向生长在 1955—1994 年时段与 5 月降水显著正相关,并在 1995—2012 年时段加剧,呈极显著正相关。

岷江柏树轮在前一时段只与 5 月均温、最高温显著负相关,至后一阶段则与 4 月均最高温显著负相关,与前一年 9 月均最低温显著正相关(图 8)。在前一阶段,与前一年 9 月降水、4 月降水显著正相关,至后一阶段则与前一年 9 月、10 月、4 月降水显著正相关,与 3 月降水显著负相关。岷江柏与前一年 9 月及当年 4 月降水的正相关性在两个时段均存在,并进一步加强;同时在后一时段出现了与 4 月均最高温的显著负相关性,表明岷江柏 4 月干旱胁迫在后一阶段加剧(图 8)。

3 讨论与结论

近百年来,全球发生了以变暖为主要特征的气候变化,在此背景下,青藏高原地区气温普遍升高^[45-48],据

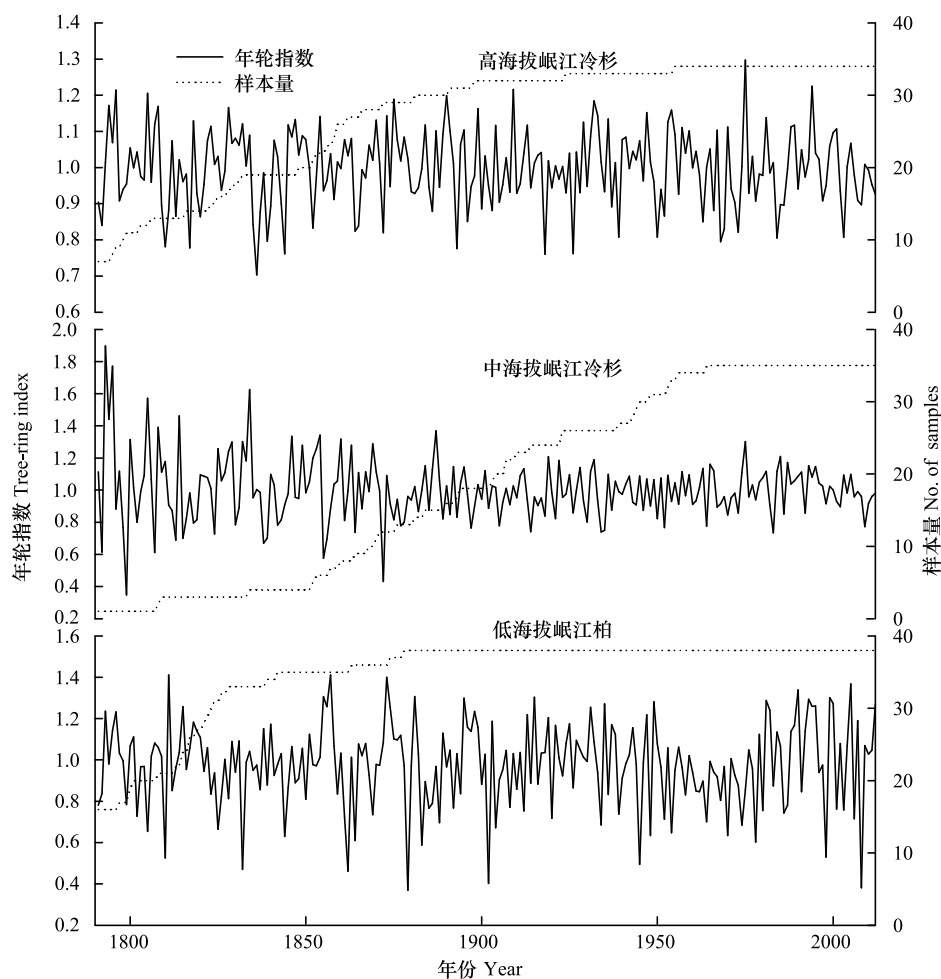


图4 川西马尔康林区不同树种的差值年表

Fig. 4 Residual chronologies of different tree species at Markang, western Sichuan

丁一汇等研究,升温突变发生在20世纪90年代中期^[39-40]。降水变化存在一定的区域差异^[45,48-50],川西地区主要呈缓慢减少的趋势^[45]。马尔康林区位于青藏高原东缘,90年代中期气温显著快速上升,降水显著下降后又缓慢上升。本文以1995年为分界点,研究升温突变前后川西马尔康林区主要针叶树种的树轮响应变化。发现,高、中海拔的岷江冷杉在升温突变之前,径向生长对温度正响应,生长趋势稳定。但是升温突变后,树木径向生长对温度的敏感性降低,年轮指数并没有随温度升高而增加,反而出现生长下降的趋势,同时出现与春季温度负相关及与降水显著正相关。春季正处于树木生长季早期,树木对水分需求较大,该时期较高的温度会加快土壤蒸发失水量并提高蒸气压差,使土壤水分不足而限制了树木的生理代谢活动,从而影响树木生长^[51]。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的正相关关系,则被认为受到干旱胁迫的影响^[52-55]。本研究中,变暖突变后,春季干旱胁迫引起岷江冷杉生长下降,造成分异现象的发生。低海拔岷江柏也存在响应分异现象,升温突变后生长并没有加快,这应当与岷江柏4月干旱胁迫在后一阶段的加强有关。

从年轮指数与月气候要素的相关分析来看,三样点树木对气候响应存在一定差异。高海拔岷江冷杉在前一时段主要表现为与冬季温度的正相关,后一阶段则转变为与4月温度的显著负相关及与4月份降水的显著正相关。表明变暖突变后,4月份春季干旱胁迫影响高海拔岷江冷杉生长。中海拔岷江冷杉在前一阶段的温度正相关性到后一阶段也消失了,但其干旱胁迫主要表现在5月份。低海拔岷江柏主要受降水影响,后一时段4月份干旱胁迫加剧。吴普等^[55]对四川西部不同针叶树种研究发现,鳞皮冷杉(*Abies squanmata*)、铁杉

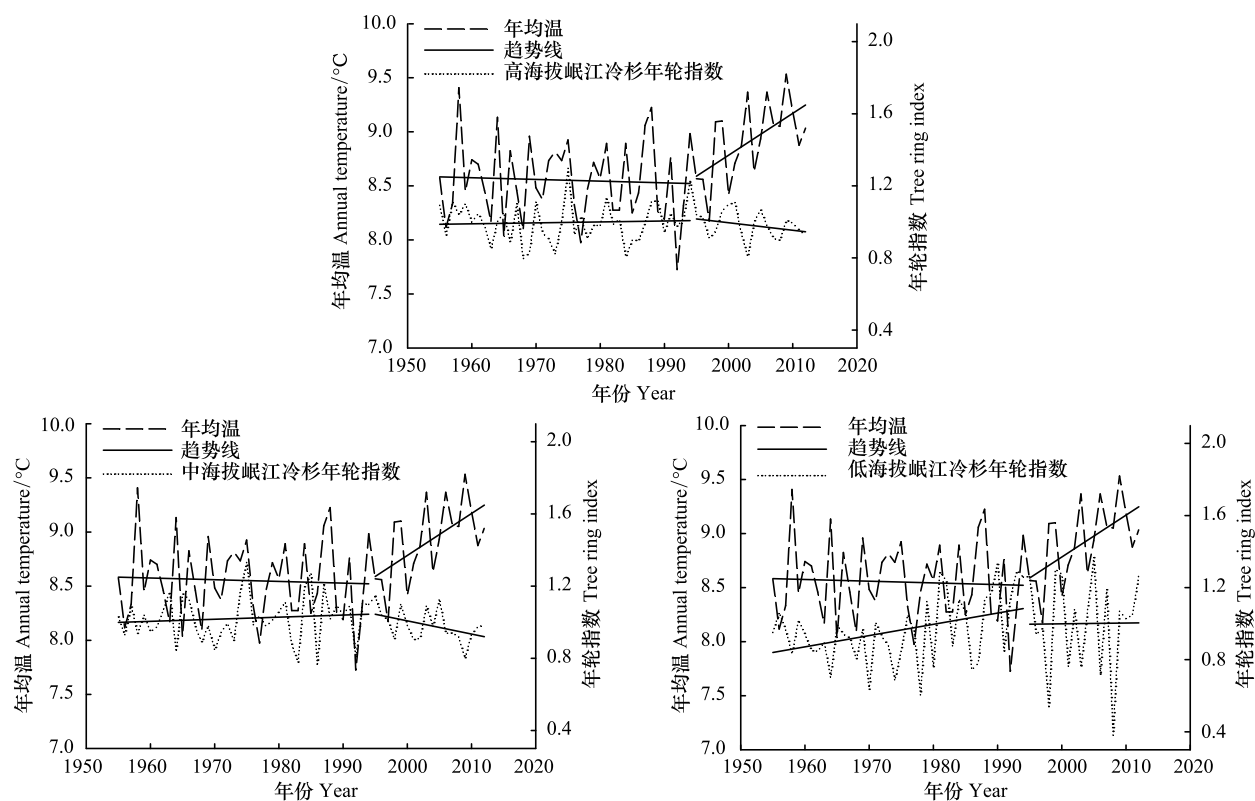


图 5 1955—2012 年时段内 1995 年前后温度变化趋势及各树种年轮指数变化趋势

Fig. 5 The trends of tree-ring index of different tree species before and after 1995 during 1955—2012

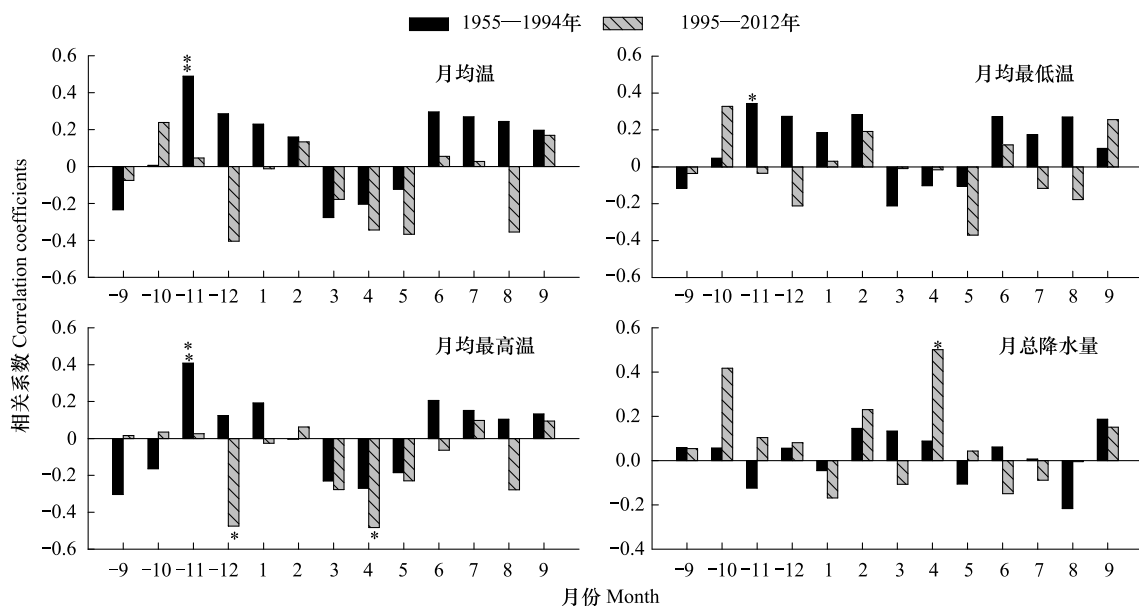


图 6 升温突变前后高海拔岷江冷杉年表与月气候要素的相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between tree-ring chronology of high altitude *Abies faxoniana* and climate data before and after warming abrupt change

注: * 代表显著 ($P < 0.05$), ** 代表极显著 ($P < 0.01$), 下同。

(*Tsuga chinensis*)、高山松 (*Pinus densata*) 也受到春季干旱胁迫。勾晓华等^[56] 也发现四川西南部川滇冷杉 (*Abies forrestii*) 生长主要受春季干旱限制。邵雪梅等^[54] 对青海德令哈地区祁连圆柏研究亦有相同发现。

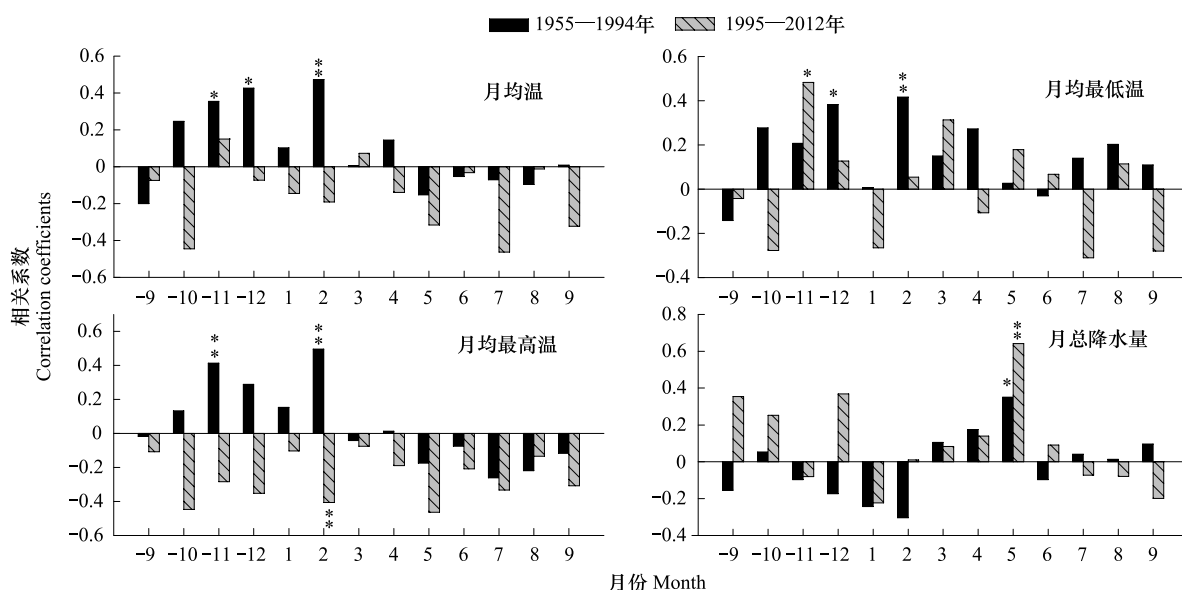


图7 升温突变前后中海拔岷江冷杉年表与月气候要素的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between tree-ring chronology of middle altitude *Abies faxoniana* and climate data before and after warming abrupt change

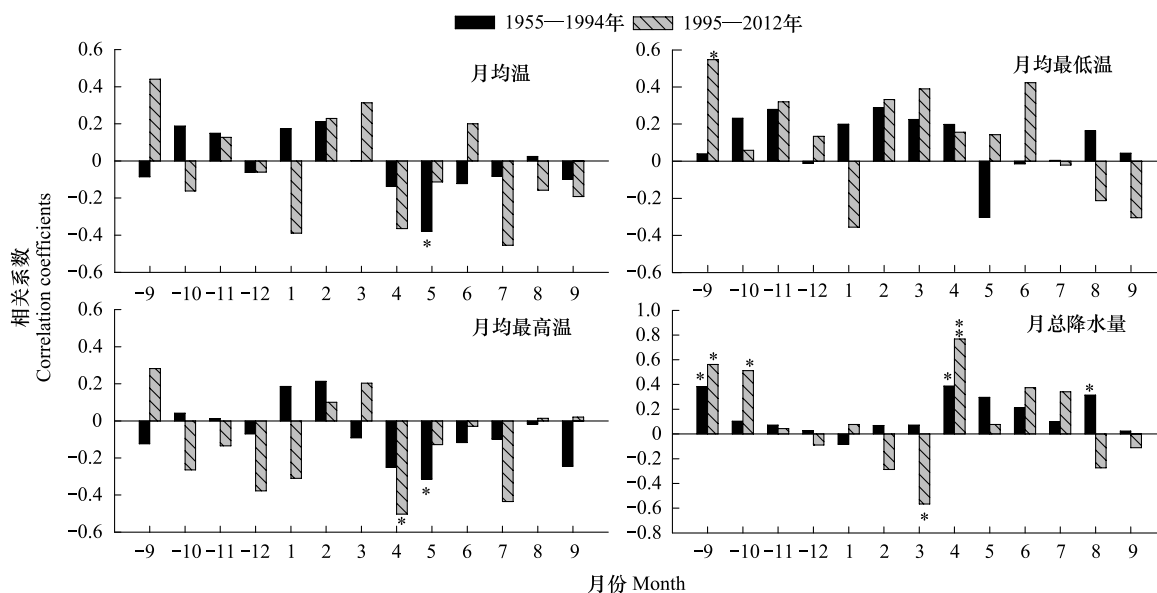


图8 升温突变前后低海拔岷江柏年表与月气候要素的相关分析

Fig. 8 Correlation analysis between tree-ring chronology of low altitude *Cupressus chengiana* and climate data before and after warming abrupt change

本文高海拔冷杉取样点位于阴坡 4000 m 附近的杜鹃冷杉林内,属林线位置,其上方为矮生杜鹃灌丛,已达到气候意义上的上限。在 1955—1994 时段,相关性显著的气候因子为前一年 11 月温度,为正相关,而与当年夏季温度表现为不显著的正相关,与当年春季温度表现为不显著的负相关。这表明,冬季严寒可能是岷江冷杉林线形成的气候学因子。该海拔处,冷杉优势木树高仅在 10 m 左右,且常出现多主干现象;在中海拔,冷杉优势木树高在 25 m 以上,没有多主干现象。冬季严寒和雪害可能是林线形成的关键因子,但春季温度的负相关性在 1955—1994 时段就存在,升温突变后,4 月降水成为显著因子,春季干旱胁迫成为影响生长的显著因子。

以往研究表明,在川西卧龙地区,岷江冷杉亦表现出明显的响应分异现象^[57];在半湿润与半干旱交界的青海阿尼玛卿山,树木生长对气候响应具有随时间变化的不稳定性,1970s 前树木生长与 4—6 月降水、Palmer 干旱指数显著相关,但 1970s 后该相关性消失^[27];在半干旱区的青海南山地区,林线树木存在显著的响应分异现象,但低海拔树木生长仅表现增强的干旱胁迫,没有发生响应分异^[58]。这表明在西南高山林区,响应分异现象的存在可能较为普遍。

响应分异现象的存在,影响着气候重建尤其是温度重建的准确性^[59-63]。主要的问题在于,将树轮年表定量地转换成过去的气候要素,需要进行校准分析,即建立转换方程,这当中一个重要的原理即“均一性”原理,其根本依据是限制树木生长的气候条件在过去和现在是一样的。而“分异”现象的存在否定了这一原理,那么年轮变化就不是气候(水文)要素的变量函数,基于树木年轮数据的气候重建序列的可靠性必须重新评估。另外,基于树木年轮与气象因子之间回归方程,而进行的未来全球变暖背景下森林生长模型、森林蓄积量等估算的准确性亦有待商榷。

参考文献 (References):

- [1] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382 (6587): 146-149.
- [2] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [3] Jacoby G C, D'Arrigo R. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(2): 227-234.
- [4] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, Osborn T J, Shiyatov S G, Vaganov E A. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, 391(6668): 678-682.
- [5] Smith K T, Čufar K, Levani č T. Temporal stability and dendroclimatology in silver fir and red spruce. *Phyton*, 1999, 39(3): 117-122.
- [6] Barber V A, Juday G P, Finney B P. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, 405(6787): 668-672.
- [7] Jacoby G C, Lovelius N V, Shumilov O I, Raspopov O M, Kurbainov J M, Frank D C. Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia. *Quaternary Research*, 2000, 53(3): 312-318.
- [8] Solberg B O, Hofgaard A, Hytteborn H. Shifts in radial growth responses of coastal *Picea abies* induced by climatic change during the 20th century, central Norway. *Ecoscience*, 2002, 9(1): 79-88.
- [9] Driscoll W W, Wiles G C, D'Arrigo R D, Wilmking M. Divergent tree growth response to recent climatic warming, Lake Clark National Park and Preserve, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(20): L20703.
- [10] Büntgen U, Frank D C, Schmidhalter M, Neuwirth B, Seifert M, Esper J. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees*, 2006, 20(1): 99-110.
- [11] 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.
- [12] Wilmking M, Myers-Smith I. Changing climate sensitivity of black spruce (*Picea mariana* Mill.) in a peatland-forest landscape in interior Alaska. *Dendrochronologia*, 2008, 25(3): 167-175.
- [13] Wilmking M, Juday G P. Longitudinal variation of radial growth at Alaska's northern treeline-recent changes and possible scenarios for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 2005, 47(2-4): 282-300.
- [14] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 2007, 60(3-4): 289-305.
- [15] Fritts H C. *Tree Ring and Climate*. York: Academic Press, 1976.
- [16] Wilson R, D'Arrigo R, Buckley B, Büntgen U, Esper J, Frank D, Luckman B, Payette S, Vose R, Youngblut D. A matter of divergence: tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112(D17): 103, doi: 10.1029/2006JD008318.
- [17] Lloyd A H, Fastie C L. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska. *Climatic Change*, 2002, 58 (4): 481-509.

- [18] Büntgen U, Frank D, Wilson R, Carrer M, Urbinati C, Esper J. Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2443-2453.
- [19] Lloyd A H, Bunn A G. Responses of the circumpolar boreal forest to 20th century climate variability. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4): 045013.
- [20] Wilmking M, D'Arrigo R, Jacoby G C, Juday G P. Increased temperature sensitivity and divergent growth trends in circumpolar boreal forests. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(15): doi: 10.1029/2005GL023331.
- [21] Pisaric M F J, Carey S K, Kokelj S V, Youngblut D. Anomalous 20th century tree growth, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05714, doi: 10.1029/2006GL029139.
- [22] Zhang K, Kimball J S, Hogg E H, Zhao M S, Oeche W C, Cassano J J, Running S W. Satellite-based model detection of recent climate-driven changes in northern high-latitude vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, 113(G3): doi: 10.1029/2007JG000621.
- [23] McGuire A D, Ruess R W, Lloyd A, Yarie J, Clein J S, Juday G P. Vulnerability of white spruce tree growth in interior Alaska in response to climate variability: dendrochronological, demographic, and experimental perspectives. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(7): 1197-1209.
- [24] Porter T J, Pisaric M F J. Temperature-growth divergence in white spruce forests of Old Crow Flats, Yukon Territory, and adjacent regions of northwestern North America. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3418-3430.
- [25] Büntgen U, Frank D, Trouet V, Esper J. Diverse climate sensitivity of Mediterranean tree-ring width and density. *Trees Structure and Function*, 2010, 24(2): 261-273.
- [26] Yonenbu H, Eckstein D. Reconstruction of early spring temperature for central Japan from the tree-ring widths of Hinoki cypress and its verification by other proxy records. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(10): L10701.
- [27] Shi C M, Masson-Delmotte V, Daux V, Li Z S, Zhang Q B. An unstable tree-growth response to climate in two 500 year chronologies, North Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2010, 28(4): 225-237.
- [28] Zhang Y X, Wilmking M, Gou X H. Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China. *Plant Ecology*, 2009, 201(1): 39-50.
- [29] Kurz W A, Stinson G, Rampley G. Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2008, 363(1501): 2261-2269.
- [30] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 侯振宏, 刘世荣. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态. *生态学报*, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [31] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [32] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. *第四纪研究*, 1999, 19(1): 81-89.
- [33] Zhang Q B, Cheng G, Yao T, Kang X, Huang J. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739.
- [34] 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.
- [35] 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*, 2008, 65(1-2): 1-11.
- [36] Liang E Y, Shao X M, Qin N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2008, 61(3-4): 313-320.
- [37] Liu Y, An Z S, Linderholm H W, Chen D L, Song H M, Cai Q F, Sun J Y, Tian H. Annual temperatures during the last 2485 years in the mid-eastern Tibetan Plateau inferred from tree rings. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, 52(3): 348-359.
- [38] 刘桂芳, 卢鹤立. 1961—2005 年来青藏高原主要气候因子的基本特征. *地理研究*, 2010, 29(12): 2281-2288.
- [39] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. *大气科学*, 2008, 32(4): 794-805.
- [40] 吕少宁, 李栋梁, 文军, 王磊, 刘蓉, 王欣. 全球变暖背景下青藏高原气温周期变化与突变分析. *高原气象*, 2010, 29(6): 1378-1385.
- [41] 蒋有绪. 川西米亚罗、马尔康高山林区生境类型的初步研究. *林业科学*, 1963, 8(4): 321-335.
- [42] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: The University of Chicago Press, 1968: 56-57.
- [43] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 1983, 44(1): 69-75.
- [44] Cook E R, Holmes R L. User's manual for program ARSTAN // Holmes R L, Adams R K, Fritts H C. *Tree-Ring Chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin with Procedures Used in the Chronology Development Work Including Users Manuals for Computer Programs COFECHA and ARSTAN*. Chronology Series VI. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986: 50-60.
- [45] 林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 354-358.
- [46] 唐红玉, 李锡福. 青海高原近 40 年来最高和最低气温变化趋势的初步分析. *高原气象*, 1999, 18(2): 230-235.

- [47] 蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 白重瑗. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化. 高原气象, 2003, 22(5): 464-470.
- [48] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2003, 27(2): 157-170.
- [49] 牛涛, 刘洪利, 宋燕, 陈隆勋. 青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代际变化特征研究. 应用气象学报, 2005, 16(6): 763-771.
- [50] 朱西德, 李林, 秦宁生, 周陆生, 汪青春, 王振宇. 青藏高原年降水量分区及变化特征. 青海环境, 2004, 14(1): 1-4, 29-29.
- [51] Oberhuber W, Stumböck M, Kofler W. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. Trees Structure and Function, 1998, 13(1): 19-27.
- [52] Fritts H C, Smith D G, Stokes M A. The biological model for paleoclimatic interpretation of Mesa Verde tree-ring series. American Antiquity, 1965, 31(2): 101-121.
- [53] 张志华, 吴祥定, 李骥. 利用树木年轮资料重建新获东天山 300 多年来干旱日数的变化. 应用气象学报, 1996, 7(1): 53-60.
- [54] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 梁尔源, 方修琦, 王丽丽. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, 34(2): 145-153.
- [55] 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. 地理研究, 2006, 25(1): 43-52.
- [56] 勾晓华, 杨涛, 高琳琳, 邓洋, 杨梅学, 陈发虎. 树轮记录的青藏高原东南部过去 457 年降水变化历史. 科学通报, 2013, 58(11): 978-985.
- [57] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 张齐兵, 胡婵娟, 罗淑政. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的稳定性评估. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1045-1057.
- [58] Zhang Y X, Wilmking M. Divergent growth responses and increasing temperature limitation of Qinghai spruce growth along an elevation gradient at the northeast Tibet Plateau. Forest Ecology and Management, 2010, 260(16): 1076-1082.
- [59] Jones P, Briffa K, Barnett T, Tett S. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. The Holocene, 1998, 8(4): 455-471.
- [60] Mann M E, Bradley R, Hughes M. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. Geophysical Research Letters, 1999, 26: 759-762.
- [61] Briffa K. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message from ancient trees. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1): 87-105.
- [62] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, Harris I C, Jones P D, Shiyatov S G, Vaganov E A. Low frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D3): 2929-2941.
- [63] D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. On the long-term context for late twentieth century warming. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D3): D03103, doi: 10.1029/2005JD006352.