利用树木年轮宽度资料重建川西米亚罗地区 过去 200 年夏季温度的变化^{*}

李宗善^① 刘国华^① 傅伯杰^① 张齐兵^② 胡婵娟^① 罗淑政^① (①中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085; ②中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京 100093)

摘要 利用川西高原米亚罗林线位置高山柏(Sabina squamata)的年轮宽度资料,分析了树轮年表和气候要素的 关系。通过相关和响应函数分析得出,树木径向生长对于夏季(6~7月)温度响应最为敏感,上年冬季到早春 (12~3月)温度也对树木生长有一定的影响,而年表与降雨没有明显的关系。最终利用树轮年表重建了该地区过 去 200年(1810~2009年)的夏季(6~7月)平均温度的波动历史,重建方程的方差解释量为 43.2%(调整自由度后 为 41.9%)。重建温度序列的波动特征大致可以分为 3 个阶段:1850年以前的寒冷时期,1850~1950年的温暖时 期以及 1950年以后的温度平缓波动时期。重建序列最为寒冷的时期为 1810~1830年,其中 1824~1825年为最寒 冷的年份;重建序列最为温暖的时期是发生在 19世纪下半叶(1850~1903年)和 20世纪的上半叶(1911~1950 年),其中 1863年和 1925年是最温暖的年份。重建温度序列的主要冷期和暖期与周围地区其他对于温度响应敏 感的树木年轮和冰芯材料以及冰川进退记录均有较好的对应关系,这表明本研究的重建序列较为可靠,是可以指 示研究地区过去温度波动历史的。

主题词	温度重建	树木年轮	米亚罗	川西高原
中图分类号	P642	2	文献标识码	Ъ A

以全球变暖为主要特征的全球变化事件对于自 然生态系统和社会经济系统已经产生并将继续产生 重大影响,已经成为当前地球科学的前沿问题^[1]。 只有将当代气候变化特征与过去长时期的气候波动 历史进行比较,才能理解当今全球气候变化的特点 及意义,并确定当今全球变暖在整个气候系统演变 中的历史地位^[2,3]。由于器测气候数据较短,人们 普遍使用各种气候代用材料来揭示不同历史时期的 气候变化规律^[4,5]。树木年轮具有定年准确、分辨 率高、连续性强、轮宽量测精度高、地域分布广泛、易 于采样、复本量大以及重建精度高等特点[6,7],这使 其在全球范围内成为研究历史时期气候变化的重要 途径之一^[8-21]。利用树木年轮资料获取气候与环 境变化的数据,不但可以了解树木历年的生长情况 及其所在地历年和远期气候变化的情况和规律,还 能得出气候变化对人类赖以生存的生态系统的影 响,从而使人类能更好地应对未来气候的变 化[22~38]。

地处青藏高原东南缘的川西高原,地形起伏大、 相对高差悬殊、地貌极为复杂,是一个生态环境非常 脆弱的地区;特殊的地理位置使得川西地区既受东 亚季风和印度季风的影响,同时也受青藏高原环流 系统的影响^[39,40]。大量研究表明川西气温、降水变 化特点,对了解全球变暖背景下青藏高原及四川省 的区域气候变化及对全球变暖区域响应差异具有重 要意义^[39]。川西亚高山暗针叶林是该区主要的森 林类型,这些森林集中分布于金沙江、雅砻江、大渡 河和岷江流域及其支流,是我国西南高山林区水源 涵养林的重要组成部分和长江上游重要的生态屏 障^[40]。川西地区丰富的森林资源也为进行树木年 轮学研究提供了充分的条件,利用树轮资料探讨该 地区气候变化的研究工作也越来越多的受到人们的 重视[41~47]。利用川西大雪山和沙鲁里山的4个地 点的川西云杉(Picea batfouriana)的树轮宽度材料,

2010-12-27 收稿,2011-01-18 收修改稿

资助

第一作者简介:李宗善男 34岁 博士后 树木年轮气候学专业 E-mail:zsli_st@rcees.ac.cn

^{*}国家自然科学基金项目(批准号:41071039),国家青年科学基金项目(批准号:31000210)和中国博士后基金项目(批准号:20100470560)

邵雪梅和范金梅[41]发现月平均最低气温对树木径 向生长的影响较大,并重建了过去345年来的冬季 平均最低气温距平序列;值得注意的是秦宁生 等^[42]发现上述地点的川西云杉的树木生长对夏季 6月份的最高温响应最为敏感,由此重建了川西地 区过去 378 年夏季 6 月份的平均最高气温序列。吴 普等^[43,44]则利用川西金川地区的高山松 (Pinus densata) 树轮最大密度序列重建了川西高原近百年 的夏季温度波动序列,并指出与四川平原地区相比, 川西高原对于气温变化的响应更为敏感,可能是气 候变化的先兆地区;宋慧明等^[45]则利用川西九寨 沟地区冷杉(Abies chensiensis)树轮资料重建了该地 区 1750 年以来冬半年平均最低温度序列。最近,李 宗善等^[46,47]则利用川西卧龙地区岷江冷杉(Abies faxoniana)的年轮宽度资料重建了该地区 1850 年以 来夏季(6~8月份)平均温度的变化历史,并在最近 两个时段(1956~1976年和1977~2008年)上探讨 了该地区树木生长对于气候响应的异质性特征。然 而与毗邻的青藏高原相比[8~10,12,17,19~21],川西地区 的树木年轮气候学研究还明显较少,只有在川西更 加广泛的地区获取树轮资料,才能较为全面地揭示 该地区树木生长对于气候响应的异质性特征及过去 数百年来的气候变化历史。

本文利用川西米亚罗地区高山柏(Sabina squamata)的树轮宽度数据,分析了其与气候要素之间的关系,并重建了自1810年以来的夏季(6~7月)温度波动序列,对其变化特征进行了分析,进而

与附近地区的温度重建序列进行了比较分析。

1 研究区自然概况

研究区位于川西米亚罗林区 (图1),处于长江 上游岷江水系一级支流:杂谷脑河汇水区,地理位 置为 31.4°~31.92°N,102.58°~103.07°E,该区属 典型的高山峡谷地貌,山峰一般在海拔 4000m 以 上,河谷多在海拔3000m以下,高差在2000m左右, 坡度多在35°左右。该区夏季温凉多雨,冬季寒冷 干燥,1月份均温-8℃,7月份均温为12.6℃,≥10℃ 的年积温为 1200~1400℃, 年降雨量为 600~ 1100mm,年蒸发量为1000~1900mm,属季风性山地 气候。米亚罗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^[48,49]。该区森林植被垂直 分布带明显,在海拔2100m以下为干旱河谷灌草植 被,海拔 2100~2500m 为落叶阔叶林带,海拔 2500~3000m 为针阔混交林带,海拔 3000~4000m 为亚高山暗针叶林带,4100m 以上为高山灌木及草 丛带。主要乔木有岷江冷杉(A. faxoniana)、紫果云 杉(Picea purpurea)、粗枝云杉(Picea asperata)、红桦 (Betula albo-sinensis)、山杨(Populus davidiana)、川 滇高山栎(Quercus aquifolioides)、高山松 (P. densata)和高山柏(S. squamata)等; 主要灌木有 杜鹃 (Rhododendron spp.)、锦鸡儿 (Caragana spp.)、箭竹(Fargesia spp.)、悬钩子(Rubus spp.)、 白刺花(Sophom davidii)等^[50,51]。



图 1 川西米亚罗地区树木年轮采样点和气象站分布图

Fig. 1 Location map of tree-ring sample site and meteorological station in the Miyaluo town of Western Sichuan, China

2 材料和方法

2.1 样品

本文所用高山柏树轮资料是 2010 年 6 月在川 西理县米亚罗镇夹壁沟林区(31.63'N,102.96°E) 南坡采集的,采样点海拔高度为 3750m,属于森林上 线,研究区域优势树种为岷江冷杉,而高山柏则呈斑 块状分布在林线附近的冷杉林中。采样树木较少受 人类活动影响,为获得较长的树木年轮样本,在树轮 样品采集点选择年龄较老的树木个体获取样本。样 芯采集通常在胸高部位,在平行于山坡方向上用生 长锥钻取树轮样本,对于某些生长在悬崖及陡坡上 或已局部枯朽的树木,限于采样环境条件,样芯的钻 取高度和方向有所不同。取到的样芯放置在塑料样 管内,并在样管上用油性笔标注代码。本研究每棵 树采集1根树轮样芯,最终获得 45 根样芯。

样品预处理基本按照 Stokes 和 Smiley^[52]的方 法进行。首先将样品放置于平坦处晾干,然后将其 粘在特制的木槽中;将粘牢的样芯依次用由粗到细 (一般为 280~600 目)不同颗粒的砂纸进行打磨。

2.2 样本处理及年表的建立

样本经预处理后,用骨架示意图进行交叉定 年^[6],然后使用 LINTAB 年轮分析仪对树木年轮宽 度逐年进行测量,该测量系统精度可达 0.001mm。 利用 COFECHA^[53]程序对定年和测量结果进行了检 验,保证定年与测量的准确。对于那些效果较差、与 主序列之间的相关系数达不到 99% 置信水平的样 芯予以剔除,最终 38 根树芯用于年表的构建。

在准确定年的基础上,利用国际通用的 ARSTAN程序建立年表^[54],为消除与树木年龄相关 的生长趋势及部分树木之间的非一致性扰动,去除 非环境"噪声",尽可能突出环境因子对树木生长的 作用,对每一序列进行标准化处理。本研究采用保 守的去趋势方法,即首先对每个年轮宽度序列进行 负指数曲线拟合,以去除与树木年龄有关的生长趋 势;如果不成功,则用任意斜率的线性回归进行直 线拟合,取树轮宽序列和与其对应的生长趋势拟合 曲线的比值,对所得到的去趋势序列进行双权重平 均(biweight robust mean),最终合成了平均值为 l、 无量纲的树轮宽度年表。ARSTAN程序除了可以建 立常规的标准年表(STD)外,还可建立差值年表 (RES)和自回归年表(ARS)^[6]。因为本研究目的主 要是突出树轮年表包含的区域气候状况为主的低频 变化信号,故选取标准年表(STD)代表本研究区域 树木年际径向生长。通过样芯间相关系数 Rbar (mean inter-series correlation)和样本群体表达信号 EPS(express population signal)在时间轴上的滑动数 值(滑动窗口为 30 年、窗口间重叠 15 年)来评估年 表的可靠性^[54],其中,EPS(阈值为 0.85)用来确定 年表的可信区间^[55];另外,考虑到年表的起始时段 由于样本量较少而波动较大,不能真实反映研究地 点的树木生长趋势,本研究年表的起始年份设置到 复本量为 5 根样芯的年份,即 1785 年。

2.3 气象资料

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,海拔 2664m, 31.96°N,102.24°E),其位于采样点西北部约 60km。气象数据由国家气象局(http://cdc.cma. gov. cn/)提供,区间为1955~2008年,经数据均一 性检验确认,该站的气象数据可靠,无明显的突变点 和随机变化,气象资料变化相对均一。为了能够了 解区域尺度气候对于树木生长的影响,利用与采样 点最近的分辨率为 0.5°×0.5° 经纬度网格化气候 数据点(31.75°N,102.75°E)的数值来指示米亚罗 地区大尺度气候特征,区间为1955~2002年,网格 化气候数据由东英吉利大学气候研究所建立的全球 气候数据库(CRU TS 2.1 Global Climate Database) 网站下载(http://www.cru.uea.ac.uk/)^[56]。图2 显示的是马尔康气象站和 CRU 网格气象数据在最 近50年来的逐月温度和降雨的波动特征。

考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响^[6,7],所用气候资料的时间跨度为前一年 10 月到 当年 10 月,马尔康气象站的气候要素和 CRU 网格 化气象数据包括月平均气温(Temperature,简写 TEM)、月平均最高气温(Maximum temperature,简写 TMX)、月平均最低气温(Minimum temperature,简写 TMN)和月降雨量(Precipitation,简写 PRE)。

3 研究结果

3.1 年表的统计学特征

构建的高山柏年表反映了米亚罗地区过去 225 年(1785~2009年)的树木径向生长的波动历史 (图3),其中样芯平均长度为 174年(58年至 235 年不等),其中,超过百年的样芯达 34根,超过 150



图 2 1955~2008年川西米亚罗地区马尔康气象站(a)和1955~2002年CRU网格化气候数据(b)的降水量(柱状)、 平均温度(三角-折线)、最高温度(方框-折线)和最低温度(圆圈-折线)的多年平均逐月变化趋势

Fig. 2 Monthly variation of total precipitation (bars), mean maximum temperature (line with squares), and mean temperature(line with triangles) and mean minimum temperature(line with circles) for Maerkang meteorological station (a) and CRU gridded climate dataset (b) in Miyaluo town of Western Sichuan, calculated for the periods of 1955 ~ 2008 and 1955 ~ 2002, respectively





年的样芯达 24 根。从 EPS 数值在时间轴上的波动 特征来看, EPS 在 1810 年(13 根样芯)以后大致趋 于稳定,数值在临界水平(0.85)附近波动(图 3c), Rbar 数值在 1810 年以后的平均数值为 0.582,也达 到了较高的水平(图 3b),这说明 1810 年到 2009 年 是年表的较为可信的区间,时间长度为 200 年。从 年表的其他统计量特征来看,年表的一阶自相关系数 AC1 (autocorrelation order 1)为 0.728,说明树木前一年的生长状况对当年生长有一定的影响^[6];年表的平均敏感度 MS (mean sensitivity)较低,仅为0.192,这说明了树轮资料具有较弱的高频波动信号。值得指出的是年表的信噪比 SNR (signal-to-

noise ratio)和第一主成分解释方差量 VFE(variance in first eigenvector)数值较低,分别为4.054 和 18.5%,这可能是因为研究区域湿润的气候导致的; 然而年表在1810~2009 年可信区间具有较高的 EPS 和 Rbar 数值,这说明样本之间的树轮宽度变化 有很好的一致性,记录了区域气候信息,构成年表的 树轮资料是适于进行年轮气候学分析的。

3.2 树木生长对气候要素的响应

树木生长与气候要素变化的关系是利用树木年 轮进行气候研究的基础,主要是通过相关和响应函 数分析的方法进行的,分析过程是由软件 DendroClim2002实现的^[57]。与马尔康气象站数据 的分析结果(分析时段为1955~2008年)表明,树 木径向生长对温度的响应较强,规律性最为明显 (图4)。其中,夏季7月份的平均、最高和最低气温 与年表均存在着显著的正相关关系,相关(r= 0.276-0.446)和响应函数分析(R=0.223-0.389) 均通过了95%的置信水平(相关和响应函数系数 分别用 r 和 R 表示)。年表还与夏季 6 月份的平均 气温和最高气温存在正相关关系,相关(r=0.356, P < 0.05)和响应函数(R = 0.221 - 0.244, P < 0.05)系 数较高;而与6月份的最低温度亦存在正相关关 系,但是相关(r=0.253)和响应函数(R=0.149)系 数未达到显著性水平。另外,年表与上年冬季到初 春(12月~3月份)的温度指标也存在正相关关系, 但大多未达到显著性水平。年表与 CRU 网格化温 度数据相关分析结果(分析时段为1955~2002年) 是与器测温度数据的相关性基本一致的(图5),但 是相关水平显著提高,譬如与夏季6~7月的平均、 最高和最低气温的相关(r=0.317-0.527, P<0.05) 分析结果均达到了显著性水平,而响应函数分析结 果(R=0.276-0.318,P<0.05)也较高,仅与7月份 最高温度和6月份最低温度的分析结果略低,未达 到显著性水平。年表与 CRU 网格化冬季到初春(12 月~3月份)的温度指标普遍存在正相关关系,与 12月(r=0.344-0.508, P<0.05)和3月(r=0.362-0.415,P<0.05)的各温度指标的相关系数还达到了



图 4 川西米亚罗地区树轮年表与器测气候要素(平均、最高、最低气温和降雨)的相关和响应函数分析 柱形图表示相关分析结果,点线图表示响应分析结果,虚线表示相关分析显著性水平线(p<0.05),*表示响应函数分析显著月份(p<0.05) Fig. 4 Correlation and response function analysis between instrumental climate data(mean, maximum and minimum temperature and precipitation) and tree-ring chronology of Miyaluo, Western Sichuan of China. Bar diagrams are the results of correlation analysis and line graphs are the results of response function analysis. The dashed lines represent significant effects(p<0.05) for correlation analysis, and the asterisks above columns represent significant effects(p<0.05) for response function analysis



Ma

Jun

Jul

Aug

Sep

Oct

图 5 川西米亚罗地区树轮年表与 CRU 网格化气候要素(平均、最高、最低气温和降雨)的相关和响应函数分析 柱形图表示相关分析结果,点线图表示响应分析结果,虚线表示相关分析显著性水平线(p<0.05),*表示响应函数分析显著月份(p<0.05) Fig. 5 Correlation and response function analysis between CRU gridded climate data(mean,maximum and minimum temperature and precipitation) and tree-ring chronology of Miyaluo, Western Sichuan of China. Bar diagrams are the results of correlation analysis and line graphs are the results of response function analysis. The dashed lines represent significant effects(p<0.05) for correlation analysis, and the asterisks above columns represent significant effects(p<0.05) for response function analysis

Ma

月份

显著程度,但是响应函数的分析结果均未达到显著 性水平。

与树木径向生长对温度的响应特征相比,年表 与降雨关系明显较弱。与器测数据的分析结果表 明,仅上年12月份降雨与年表存在一定的负相关关 系,相关(r=-0.29,P<0.05)和响应函数分析结果 (R=-0.28,P<0.05)较高(图4)。与CRU网格化 数据的分析结果表明,仅3月份降雨与年表存在一 定的负相关关系,相关(r=-0.34,P<0.05)和响应 函数分析结果(R=-0.27,P<0.05)较高;另外年表 还与8月份的降雨存在一定的相关性,但仅相关分 析结果(r=-0.3,P<0.05)通过了显著性水平 (图5)。

从相关和响应函数分析结果看,研究区域树木 的径向生长主要受温度的制约,而与降雨关系较弱。 树木生长与上年冬季到初春(12月~3月)温度存 在一定的正相关关系,但是相关分析结果大多未达 到显著性水平;而夏季温度(6~7月份)对于树木 生长均有一致的正相关关系,相关和响应函数分析 达到了显著程度,且年表与 CRU 网格化数据的相关 性要明显强于器测数据。考虑到树木生长对于夏季 平均、最高和最低气温响应关系的相似性以及重建 要素的意义和代表性,本文利用年表与 CRU 网格化 数据组建的转换方程,用于夏季(6~7月份)平均温 度重建。

3.3 气候重建构建及检验

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。采用回归分析 的方法来建立转换方程。利用年表指数序列与夏季 温度建立的线性回归方程如下:

y = 8.72 + 3.85x,

($r=0.\,657\,, R^2=43.\,2\%\,$, ${\rm R}^2_{{\it adj}}=41.\,9\%\,$, p $< 0.\,01\,)$

式中, y 为夏季温度(6~7月), x 为树轮年表的 指数序列。

回归方程建立之后,必须对其进行稳定性检验, 由于校准长度仅为48年(1955~2002年),难以采 用独立检验的方法,故采用年轮研究中常用的逐一

相关系数(Correlation coefficients)

94

pOct

٥No

pDec

Jar

表1 气候重建模型的留一法统计检验*

Table 1 Leave-one-out cross-validation statistics of climate-growth model for climate reconstruction

	r	R^2	$R^2_{ m adj}$	RE	CE	ST	PMT	DW
校准 Calibration	0.657	0. 432 **	0. 419 **	-	-	-	-	-
验证 Verification	0.621	0. 385 **	0. 372 **	0.384	0. 285	42 + /13-**	3. 35 **	2.092

* r——相关系数; R²——方差解释量; R²_{adj}——调整方差解释量; RE——缩减误差; CE——效率系数; ST——符号检验; PMT——乘积平均值检验; DW——Durbin-Watson 检验

** *p* < 0.01

剔除法(leave-one-out)对回归方程的可靠性进行检 验^[58]。对于重建的校准期(1955~2002年),重建 方程的相关系数为0.657,方差解释量是43.2%,调 整自由度后方差解释量为 41.9%, 均达到了 99% 的 置信水平(表1)。从重建夏季温度序列与器测数据 在最近50年来的波动趋势看,重建序列较好地拟合 了器测数据的波动规律(图 6a)。对于重建方程的 符号检验和乘积平均值检验也通过了 99% 显著性 水平检验,缩减误差和效率系数的数值均较高,分别 为 0.384 和 0.285, 一般认为, 缩减误差和效率系数 为正值时,所检测的数据是可靠的;重建模型的 Durbin-Watson 检验数值为 2.092,表明重建回归模 型中的误差项是独立的,结论是可信的。回归模型 的估计和假设所做出的重建模型的各种检验参数均 通过了统计检验,说明该模型是较为稳定和可靠的, 可用于该地区夏季温度(6~7月)的历史重建。

3.4 重建夏季温度序列的波动特征

依据转换方程,重建了川西米亚罗地区夏季 (6~7月)温度过去 200年(1810~2009年)来的变 化(图 6b),重建温度序列的平均值为 12.49℃,标 准差为0.515℃。为了较好地区分重建序列中温暖 和寒冷事件,我们根据重建序列的数值进行分类,将 偏离 1 倍标准差(0.515℃)且小于 2 倍标准差 (1.029℃)的年份称为偏暖/冷年份,将偏离2倍标 准差(1.029℃)且小于3倍标准差(1.543℃)的年 份称为明显偏暖/冷年份,将偏离3倍标准差 (1.543℃)及以上的年份称为极端偏暖/冷年份。 从图 6b 可以看出,该地区温度变化还是比较明显 的。重建温度序列显示在1850年以前,气候以寒冷 为主,仅1828~1832年的温度数值高于平均数值, 其中1828~1831年为偏暖年份;其他年份的温度 均明显低于平均数值;其中1824~1825年数值仅 为10.64~10.88℃,为极端偏冷年份,也是重建序 列最为寒冷的年份。在该时段明显偏冷的年份有 1810年和1817年, 而偏冷年份有1811年、1816年、 1819~1820年、1823年、1826年、1837~1843年和 1848年。重建序列在1850~1950年时期,气候则 以温暖为主,其中1850~1903年和1911~1950年 都是重建序列最为明显的温暖时期;重建序列明显 偏暖的年份均均分布在这两个温暖时期,依次为 1854年、1863年、1925年和1928年,其中1863年和 1925 年是重建序列最为温暖的年份; 值得注意的 是,重建序列没有出现极端偏暖的年份。在该时段 的偏暖年份达19年,占重建序列偏暖年份的 73.1%,依次为1856年、1871年、1884年、1901~ 1902年、1917年、1920~1921年、1927年、1929~ 1934年、1938年和1941~1943年。在1950年以 后,重建序列基本上是在平均数值附近波动,仅在 1973~1985年出现了一个寒冷时期,其中以1976 年为一明显偏冷年份,而1974年和1977~1978年 为偏冷年份;而该时期其他时段温度波动很小,仅 1972年、1987年和2002年表现为偏暖年份。

4 讨论

4.1 树木生长与气候要素关系的解释

通常认为,森林分布的海拔上线和纬度北界的 树木生长主要受夏季温度的制约^[59,60],而北半球高 海拔和纬度较高地区的树木年轮数据也被广泛地用 于大尺度夏季温度的重建研究中^[2,4,5,23]。本研究 的相关和响应函数分析均表明,川西米亚罗地区林 线位置高山柏的树木生长主要受夏季温度(6~7 月)的制约,而这进一步证实了温度对于林线位置 树木生长的控制性影响。夏季6~7月正是树木生 长旺盛的阶段,较高的气温有利于光合作用、细胞分 裂以及细胞生长,从而有效地促进树木的生 长^[61,62]。与之相反,夏季低温常常伴随着较多的降 雨,后者会导致较高的相对湿度和较少的日照时数, 从而降低了净光合作用产物的积累,导致较窄年轮 的出现^[42,46,63]。夏季温度对于树木生长的限制性 作用在川西及其附近地区均得到了验证,如川西高



图 6 川西米亚罗地区的气候重建

(a)实测与重建夏季温度序列比较(1955~2002年)
 (b)夏季温度重建序列(1810~2009年),黑色粗线是 11 年滑动平均
 Fig. 6 Climate reconstruction in Miyaluo, Western Sichuan of China. (a) The comparison of actual and reconstructed summer temperature from 1955 to 2002. (b) Tree-ring reconstruction of summer temperature, plotted annually from 1810 to 2009, along with a smoothed 11-year moving average

原的大雪山和沙鲁里山的川西云杉的树木年轮材料 被发现可用来指示初夏(6月份)的平均最高气温变 化^[42];吴普等^[43]发现川西小金地区的高山松年轮 的最大密度序列与夏季(6~9月)温度相关性最为 显著,李宗善等^[46]则发现在川西卧龙地区,夏季 (6~8月)温度是林线位置岷江冷杉径向生长的主 要限制性气候要素; Fan 等^[64]则利用滇西北横断山 区麦吊云杉(Picea brachytyla)的树轮材料重建了该 地区过去 250 年来的温暖季节(4~9月)的温度波 动,Liang等^[65]也发现夏季温度(6~8月)对于黄河 源地区的云杉(Picea likiangensis var. balfouriana)树 木生长存在明显的制约作用。由以上论述可知,夏 季温度对于川西及附近地区树木生长的限制性影响 是明确的,只是在夏季那些月份组合对于树木生长 影响最为明显方面,由于不同地点的研究结果不同, 人们还存在一定的争议。只有在川西及附近地区更 加广泛的地区采集树木年轮材料,才能更加全面地 揭示该地区树木生长对于夏季温度响应的空间异质 性问题。

米亚罗地区的树木生长在很大程度上受初春3 月份温度的影响,生长季前期温度的高低将直接影 响树木生长期开始的早晚,早春温度偏高不仅相应 地延长树木生长期的长度,还能促进冬季积雪的融 化,使得树木前期生长得到比较完备的水分,有利于 树木后期生长的增强^[66-68]。冬季温度对于树木的 径向生长也有一定的正影响作用,这也具有一定的 生理意义。本研究的采样地区位于高山林线位置, 海拔较高(在 3750m 以上),冬季漫长且温度偏低, 温暖的冬季则可以避免叶组织冻结,保证代谢活动 正常,从而使树木的来年生长潜力增大^[41,69];而冬 季温度偏低时,使植物叶细胞内原生质脱水,还可能 因土壤冻结而导致树木根系冻死,造成来年光合作 用减低,且使树木生长期缩短,从而形成窄年轮^[70]。 已经有研究表明冬季温度也对川西大雪山和沙鲁里 山的川西云杉、九寨沟地区的冷杉和卧龙地区的岷 江冷杉均有限制性影响^[41,45,46]。另外,本研究还发 现降雨与树木径向生长无明显的相关关系,这也是 可以理解的,一般认为降雨对于森林上线的树木生 长影响是不显著的^[6,71,72]。

4.2 重建序列的历史波动特征

基于树轮资料的重建序列反映了川西米亚罗地 区过去 200 年的夏季温度波动历史,根据重建序列 在数十年尺度上的波动趋势(图 6b),重建序列大 致可以分为 3 个阶段:1850 年以前的寒冷时期, 1850~1950 年的温暖时期以及 1950 年以后的温度 平缓波动时期。本重建序列最为明显的寒冷时期为 1810~1830 年,该寒冷时期在附近地区的年轮资料 中也有明显体现,譬如横断山区的温度重建序列显 示在 1790~1800 年代和 1810~1820 年代存在两个

9

明显的寒冷时期^[73],青藏高原东部^[74]和长江源地 区^[65]的温度重建序列则分别显示 1800~1820 年代 和1820~1830年代的温度明显较低;重建序列还 表明,当地气候在1834~1848年也经历了一次较为 明显的寒冷时期,这个寒冷时期在川西大雪山和青 藏高原南部的树轮资料中均有相应的体现^[41,74]。 青藏高原的西部的古里雅冰芯中δ¹⁸0同位素记录 的温度序列表明18世纪末和19世纪上半叶的寒冷 时期是过去300年来最为明显的[75],而青藏高原东 部的普若岗日冰芯和西部的敦德冰芯中的δ¹⁸0同 位素同样在1780~1840年代记录了数次较为明显 的寒冷时期^[76],而这都是与本研究的温度重建序列 有着较好的对应关系。从19世纪中叶开始,研究区 域的气候进入一个较为明显的温暖时期,其中以 1910~1950年代的温暖时期最为显著,而青藏高原 南部^[74]、喜马拉雅山脉东段的树轮资料^[77]以及古 里雅冰芯中δ¹⁸O同位素^[75]同样记录了在20世纪上 半叶,气候存在明显的温暖时期;而这个温暖时期 在横断山区^[73]、长江源地区^[65]以及附近的川西大 雪山地区[41]虽然也有所体现,但是温暖程度已经明 显降低。重建序列中另外一个明显的温暖时期为 1850~1890年代,其中又以1850~1874年和 1884~1899年的温度数值最高,该温暖时期在周围 地区基于年轮数据的温度重建序列均有一定的体 现,如川西九寨沟地区 1860~1880 年代^[45]、喜马拉 雅山脉中段的1870~1890年代[77]和青藏高原南部 地区的 1860~1870 年代及 1880 年代[74] 都是过去 较为温暖的时期,这与本文的研究结果基本一致的。 重建序列显示温度波动在 20 世纪下半叶大致趋于 平缓,与1950年以前相比无明显的冷期和暖期,仅 在1963~1985年出现一个较为明显的寒冷时期; 另外,横断山区的玉龙雪山白水1号冰川和梅里雪 山明永冰川分别在 1957~1982 年和 1959~1982 年 表现为持续的前进^[78],这表明当时气候正处于一个 明显的寒冷时期,而这也是与米亚罗树轮年表所指 示的温度信号基本吻合的。

由温室效应引起的全球变暖已经越来越受到各 国政府和科学家的关注,政府间气候变化专门委员 会(IPCC)第四次评估报告指出,1906-2005 年全球 平均地面气温升高了 0.74±0.18℃,20 世纪的全球 变暖趋势在过去千年历史是前所未有的^[1]。众多 基于树木年轮材料的大尺度气候重建研究也指出了 近代的变暖趋势,这表明树木生长速率在近代对于 温度升高的响应是敏感的^[2,5,23]。从本研究的温度 重建序列来看,虽然在20世纪上半叶的温暖时期是 过去 200 年来最为明显的,但是 1950 年以后的温度 波动趋于平缓,而且在20世纪60~80年代有一个 较为寒冷的时期,这是与上述全球变暖趋势有所不 符的,而20世纪下半叶温度偏低的特征也被川西及 附近地区基于树木年轮材料的温度重建序列所广泛 证实,如川西大雪山和沙鲁里山^[41,42]、滇西北的横 断山区^[64]、青藏高原的东南部^[74]以及喜马拉雅山 区^[77,79]。李晓文等^[80]通过分析四川省的器测气象 数据也表明,该地区在过去几十年来出现了冬、夏气 温下降的趋势,并归因于近地面层硫化物气溶胶粒 子浓度的增加导致的"阳伞效应"已经抵消甚至超 过温室效应的升温作用,这可能是川西地区在近代 出现温度偏低现象的原因之一。然而,由于川西高 原复杂的地质地貌特征,只有在该地区更加广泛范 围开展树木年轮气候学研究,才能较为科学地认识 该地区树木生长对于近代气候变暖的响应特征。

5 结论

四川米亚罗地区林线位置的高山柏的树轮生长 对气候变化的响应比较明显,影响树木径向生长的 主要限制因子是夏季(6~7月份)温度。另外,冬季 至初春(12~3月)的温度对树木生长也有一定的限 制性影响,而降雨与树木年轮的生长关系不明显。 通过夏季温度重建序列可以看出,该地区过去200 年(1810~2009年)来的温度波动特征大致可以分 为3个阶段:1850年以前的寒冷时期,1850~1950 年的温暖时期以及1950年以后的温度平缓波动时 期。重建序列最为寒冷的时期为1810~1830年,而 最为温暖的时期是发生在 1850~1903 年和 1911~ 1950年;极端偏冷分布发生在1824~1825年,重建 序列没有出现极端偏暖的年份;明显偏冷的年份发 生在 1810 年、1817 年和 1976 年, 而明显偏暖的年 份发生在 1854 年、1863 年、1925 年和 1928 年; 偏 冷年份发生在 1811 年、1816 年、1819~1820 年、 1823年、1826年、1837~1843年、1848年、1974年 和 1977~1978年, 而偏暖年份发生在 1828~1831 年、1856年、1871年、1884年、1901~1902年、1917 年、1920~1921年、1927年、1929~1934年、1938 年、1941~1943年、1972年、1987年和2002年。重 建温度序列的主要冷期和暖期与周围地区其他对于 温度响应敏感的树木年轮和冰芯材料以及冰川进退 记录均有较好的对应关系,这表明本研究的重建序 列较为可靠,是可以指示川西米亚罗地区过去200 年来的夏季温度波动历史的。

致谢 中国科学院植物研究所邱红岩老师和刘 彩云老师对于年轮样本处理和分析给予了极大的支 持,中国科学院植物研究所张金龙博士、刘国芳博士 在数据分析方法和标本鉴定上给予了热情帮助,一 并表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 80 ~ 131
- 2 Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(36): 13252 ~ 13257
- 3 Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M et al. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. Science, 2010, 328:486~489
- 4 Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H et al. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, **393**:450 ~ 455
- 5 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 295:2250 ~ 2253
- 6 Fritts H C. Tree Rings and Climate. New York: Academic Press, 1976. 1 ~ 567
- 7 Schweingruber F H. Tree Rings and Environment. Dendroecology. Bern: Haupt, 1996. 1 ~ 609
- 8 Shao X M, Huang L, Liu H B et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. Science in China (Series D), 2005, 48 (7):939 ~949
- 9 Zhang Q B, Qiu H Y. A millennium-long tree-ring chronology of Sabina przewalskii on North Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. Dendrochronologia, 2007, 24:91~95
- 10 Gou X H, Chen F H, Yang M X et al. Asymmetric variability between maximum and minimum temperatures in North Eastern Tibetan Plateau: Evidence from tree rings. Science in China (Series D),2008,51(1):41~55
- 11 D'Arrigo R, Jacoby G, Buckley B et al. Tree growth and inferred temperature variability at the North American Arctic treeline. Global and Planetary Change, 2009, 65 (1 ~ 2):71 ~ 82
- 12 Fang K Y, Gou X H, Chen F H et al. Reconstructed droughts for the south Eastern Tibetan Plateau over the past 568 years and its linkages to the Pacific and Atlantic Ocean climate variability. Climatic Dynamics, 2009, doi: 10.1007/s00382 - 00009 - 00636 -00382
- 13 Friedrichs D A, Trouet V, Büntgen U et al. Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. Trees-Structure and Function, 2009, 23(4):729 ~ 739
- 14 Zhu H F, Fang X Q, Shao X M et al. Tree ring-based February-April temperature reconstruction for Changbai Mountain in North East China and its implication for East Asian winter monsoon. Climate of

the Past, 2009, 5(4):661~666

- 15 Büntgen U, Trouet V, Frank D et al. Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. Quaternary Science Reviews, 2010, 29 (7-8):1005 ~ 1016
- 16 Fan Z X, Bräuning A, Tian Q H et al. Tree ring recorded May-August temperature variations since A. D. 1585 in the Gaoligong Mountains, South Eastern Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 296 (1-2):94 ~ 102
- Liang E Y, Wang Y F, Xu Y et al. Growth variation in Abies georgei var. smithii along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, South Eastern Tibetan Plateau. Trees-Structure and Function, 2010, 24(2): 363 ~ 373
- 18 Liu Y, Tian H, Song H M et al. Tree ring precipitation reconstruction in the Chifeng-Weichang region, China, and East Asian summer monsoon variation since AD 1777. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2010, doi: 10.1029/ 2009JD012330
- 19 Peng J F, Gou X H, Chen F H et al. Climate-growth relationships of Qilian juniper Sabina przewalskii in the Anyemaqen Mountains, Tibet. Climate Research, 2010, 41(1):31~40
- 20 Yang B, Brauning A, Liu J J et al. Temperature changes on the Tibetan Plateau during the past 600 years inferred from ice cores and tree rings. Global and Planetary Change, 2009, 69 (1~2):71~78
- 21 Yang B, Kang X C, Liu J J et al. Annual temperature history in South West Tibet during the last 400 years recorded by tree rings. International Journal of Climatology, 2010, 30(7):962~971
- 22 谭 明,邵雪梅,刘晓宏等.中国近千年石笋-树轮集成温度记录.气候变化研究进展,2006,2(3):113~118 Tan Ming, Shao Xuemei, Liu Xiaohong *et al.* A 1000-year temperature record synthesized by combining stalagmite and tree rings from China. *Advance in Climate Change Research*,2006,2(3): 113~118
- 23 Osborn T J, Briffa K R. The spatial extent of 20th-Century warmth in the context of the past 1200 years. Science, 2006, 311 (5774): 841 ~ 844
- 24 Esper J, Frank D. Divergence pitfalls in tree-ring research. Climatic Change, 2009, 94(3-4):261 ~ 266
- 25 Wilson R, Cook E, D'Arrigo R et al. Reconstructing ENSO: the influence of method, proxy data, climate forcing and teleconnections. Journal of Quaternary Science, 2010, 25(1):62 ~ 78
- 26 史江峰,刘 禹, Vaganov E等. 贺兰山油松生长的气候响应机制 初步探讨. 第四纪研究, 2005, 25(2):245~251 Shi Jiangfeng, Liu Yu, Vaganov E et al. A primary discussion on the climatic response of *Pinus tabulaeformis* in the Helan Mountain. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2):245~251
- 27 史江峰, 鹿化煜, 万建东等. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘 近百年冬半年温度. 第四纪研究, 2009, 29(4):831~836 Shi Jiangfeng, Lu Huayu, Wan Jiandong *et al.* Winter-half year temperature reconstruction of the last century using *Pinus armandii* Franch tree-ring width chronology in the Eastern Qinling Mountains. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(4):831~836
- 28 邵雪梅,王树芝,徐 岩等.柴达木盆地东北部 3500 年树轮定年 年表的初步建立.第四纪研究,2007,27(4):477~485 Shao Xueming, Wang Shuzhi, Xu Yan et al. A 3500-year master treering dating chronology from the northeastern part of the Qaidam Basin. Quaternary Sciences, 2007,27(4):477~485
- 29 Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K et al. 2500 Years of European

Climate Variability and Human Susceptibility. Science, 2011, $\mathbf{331}:$ 578 \sim 582

30 Li Z S, Zhang Q B, Ma K P. Tree-ring reconstruction of summer temperature for A. D. 1530 ~ 2003 in the Central Hengduan Mountains, North Western Yunnan, China. *Climatic Change*, 2011, In press

31 Shi C M, Masson-Delmotte V, Risi C et al. Sampling strategy and climatic implications of tree-ring stable isotopes on the south East Tibetan Plateau. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301:307 ~ 316

- 32 王亚军,马玉贞,鲁瑞洁等.树木年轮记录的祁连山东段公元 1895 年来的气温变化.第四纪研究,2009,29(5):905~912 Wang Yajun, Ma Yuzhen, LuRuijie *et al.* Reconstruction of mean temperatures of January to August since A. D. 1895 based on tree ring data in the eastern part of the Qilian Mountains. *Quaternary sciences*,2009,29(5):905~912
- 33 刘 禹,田 华,宋慧明等. 油松年轮记录的河北围场公元 1884 年以来 5~6 月平均温度. 第四纪研究, 2009, 29(5):896~904 Liu Yu, Tian Hua, Song Huiming *et al.* Tree ring based reconstruction of the May ~ June mean temperature since A. D. 1884 in Weichang, Hebei Province, China. *Quaternary Sciences*, 2009, 29 (5):896~904
- 34 刘 禹,田沁花,宋慧明等.以树轮宽度重建公元1558年以来华山5~6月平均温度及20世纪中后期升温.第四纪研究,2009,29(5):888~895

Liu Yu, Tian Qinhua, Song Huiming *et al.* Tree-ring width based May-June mean temperature reconstruction for Hua Mountains since AD 1558 and 20th century warming. *Quaternary Sciences*, 2009, **29** (5):888 ~ 895

35 刘 禹,王 雷,史江峰等.利用贺兰山北部树轮资料重建过去 270年以来6~8月平均干燥指数.第四纪研究,2005,25(5): 540~544

Liu Yu, Wang Lei, Shi Jiangfeng *et al.* Reconstruction of mean drought index from June to August for the last 270 years using treering data in the Northern Helan Mountain. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(5): $540 \sim 544$

- 36 勾晓华,杨梅学,彭剑峰等. 树轮记录的阿尼玛卿山区过去 830 年夏半年最高温变化. 第四纪研究,2006,26(6):991~998 Gou Xiaohua, Yang Meixue, Peng Jianfeng *et al.* Maximum temperature reconstruction for Animaqing Mountains over past 830 years based on tree-ring records. *Quaternary Sciences*,2006,26(6): 991~998
- 37 孙军艳,刘 禹,蔡秋芳等.额济纳 233 年来胡杨树轮年表的建立及其所记录的气象、水文变化.第四纪研究,2006,26(5):799~807
 Sun Junyan, Liu Yu, Cai Qiufang *et al.* Climatic and hydrological changes of Ejin, Inner Mongolia, China during the past 233 years

recorded in tree-rings of *Populus euphratica*. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(5):799 ~ 807

38 李 强,刘 禹,蔡秋芳等.山西宁武地区 1686 年以来年降水重建.第四纪研究,2006,26(6):999~1006
Li Qiang, Liu Yu, Cai Qiufang *et al.* Reconstruction of annual precipitation since 1686A. D. from Ningwu region, Shanxi Province.

Quaternary Sciences, 2006, 26(6):999~1006
39 李 川,陈 静,朱燕君.川西高原近五十年气候变化的初步研究.高原气象, 2003, 22(B10):138~144

Li Chuan, Chen Jing, Zhu Yanjun. Preliminary research on climatic

change of West Sichuan Plateau in recent fifty years. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(B10):138~144

- 40 四川植被被协作组.四川植被.成都:四川人民出版社, 1980.33~55
 Collaborating Group for Vegetation of Sichuan. Vegetation of Sichuan. Chengdu: Sichuan People's Press, 1980.33~55
- 41 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,(1):81~89 Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on West Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of Dragon Spruce. *Quaternary Sciences*,1999,(1):81~89
- 42 秦宁生,时兴和,邵雪梅等.川西高原树木年轮所指示的平均最高气温变化.高原山地气象研究,2008,28(4):18~24 Qin Ningsheng, Shi Xinghe, Shao Xuemei *et al.* Average maximum temperature change recorded by tree rings in West Sichuan Plateau. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,2008,28(4):18~24
- 43 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温度.地理学报,2005,60(6):998~1006
 Wu Pu, Wang Lili, Shao Xuemei. Reconstruction of summer temperature from maximum latewood density of *Pinus densata* in West Sichuan. Acta Geographica Sinica,2005,60(6):998~1006
- 44 Wu Pu, Wang Lili, Shao Xuemei. Reconstruction of summer temperature variation from maximum density of alpine pine during 1917 - 2002 for West Sichuan Plateau, China. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18:201 ~ 210
- 45 宋慧明,刘 禹,倪万眉等. 以树轮宽度重建九寨沟 1750 年以来 冬半年平均最低温度. 第四纪研究 2007,27(4):486~491 Song Huiming, Liu Yu, Ni Wanmei *et al.* Winter mean lowest temperature derived from tree-ring with in Jiuzhaigou region, China since 1750 A. D. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(4):486~491
- 46 李宗善,刘国华,张齐兵等.利用树木年轮宽度资料重建川西卧 龙地区过去159 年夏季温度的变化.植物生态学报,2010,34
 (6):628~641

Li Zongshan, Liu Guohua, Zhang Qibing *et al.* Tree ring reconstruction of summer temperature variations over the past 159 years in Wolong National Natural Reserve, Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(6):628 ~ 641

47 李宗善,刘国华,傅伯杰等.川西卧龙国家级自然保护区树木生 长对气候响应的时间稳定性评估.植物生态学报,2010,37(9): 1045~1057

Li Zongshan, Liu Guohua, Fu Bojie *et al.* Evaluation of temporal stability in tree growth-climate response in Wolong National Natural Reserve, Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010,**37**(9):1045 ~ 1057

- 48 陈林武,刘兴良,牟克华等.川西米亚罗天然林保护区封山育林 效果研究.四川林业科技,2002,23(1):7~14 Chen Linwu, Liu Xingliang, Mu Kehua *et al.* Analysis of closure effect in the natural forest protection region of Western Sichuan. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*,2002,23(1): 7~14
- 49 尹华军,刘 庆.川西米亚罗亚高山云杉林种子雨和土壤种子库研究.植物生态学报,2005,29(1):108~115
 Yin Huajun, Liu Qing. Seed rain and soil seed bands of *Picea* asperata in subalpine spruce forests, Western Sichuan, China. Chinese Journal of Plant Ecology,2005,29(1):108~115
- 50 张远东,赵常明,刘世荣.川西米亚罗林区森林恢复的影响因子 分析.林业科学,2005,41(4):189~193

Zhang Yuandong, Zhao Changming, Liu Shirong. The influence factors of subalpine forest restoration in Miyaluo, West Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, **41**(4):189~193

- 51 姬文元,邢韶华,郭 宁等.川西米亚罗林区云冷杉林健康状况 评价.林业科学,2009,45(3):13~18 Ji Weiyuan, Xing Shaohua, Guo Ning *et al.* Health evaluation on Spruce and Fir forests in Miyaluo of the Western Sichuan. Scientia
- Silvae Sinicae, 2009, 45(3):13 ~ 18
 Stokes M A, Smiley T I J. An introduction to tree-ring dating.
- Chicago: The University of Chicago Press, 1968. 1 ~ 73
 53 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43:69 ~ 78
- 54 Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 104 ~ 132
- 55 Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23:201 ~ 213
- 56 Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated highresolution grids. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(6): 693 ~ 712
- 57 Biondi F, Waikul K. DendroClim2002: A C++program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 2004, 30:303 ~ 311
- 58 Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(11):1589 ~ 1600
- 59 Körner C. Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. Berlin: Springer, 1999. 1 ~ 344
- 60 Körner C, Paulsen J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 2004, 31:713 ~ 732
- 61 Tranqullini W. Physiological Ecology of the Alpine Timeberline. New York: Springer-Verlag, 1979. 1 ~ 137
- 62 王晓春,周晓峰,孙志虎.高山林线与气候变化关系研究进展.生态学杂志,2005,24(3):301~305 Wang Xiaochun, Zhou Xiaofeng, Sun Zhihu. Research advances in

the relationship between alpine timberline and climate change. Chinese Journal of Ecology, 2005, **24**(3):301 ~ 305

- 63 王 婷,于 丹,李江风等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报,2003,27(1):23~33
 Wang Ting, Yu Dan, Li Jiangfeng *et al.* Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width. *Acta Phytoecologica Sinica*,2003,27(1):23~33
- 64 Fan Z X, Bräuning A, Bao Y et al. 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
- 65 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
- 66 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应. 地理学报,1995,51
 (3):260~265

Li Peiji. Response of Tibetan snow cover to global warming. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(3):260 ~ 265

- 67 Vaganov E A, Hughes M K, Kirdyanov A V et al. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. Nature, 1999,400:149 ~ 151
- 68 Cleaveland M K, Stahle D W, Therrell M D et al. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. Climatic Change, 2003, 59(3):369 ~ 388
- 69 Pederson N, Cook E R, Jacoby G C et al. The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern-rangemargin tree species. *Dendrochronologia*, 2004, 22:7 ~ 29
- 70 袁玉江,李江风.天山乌鲁木齐河源 450a 冬季温度序列的重建 与分析.冰川冻土,1999,21(1):64~70 Yuan Yujiang, Li Jiangfeng. Reconstruction and analysis of 450's winter temperature series in the Ürümqi River source of Tianshan Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999,21(1): 64~70
- 71 LaMarche V J. Frequency-dependant relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendroclimatic implications. *Tree-Ring Bulletin*, 1974, 34:1 ~ 20
- 72 Wilson R J S, Hopfmueller M. Dendrochronological investigations of Norway spruce along an elevational transect in the Bavarian Forest, Germany. *Dendrochronologia*, 2001, 19(1):67 ~ 79
- 73 Fan Z X, Bräuning A, Cao K F et al. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the Central Hengduan Mountains, South Western China. Forest Ecology and Management, 2009, 258 (3): 306 ~ 313
- 74 Bräuning A. Tree-ring evidence of 'Little Ice Age' glacier advances in Southern Tibet. *Holocene*, 2006, 16(3):369 ~ 380
- 75 杨梅学,姚檀栋.近 300a来古里雅冰芯记录的气候突变事件.冰 川冻土,2002,24(6):717~722 Yang Meixue,Yao Tandong. Abrupt climate change events recorded in the Guliya ice core in the past 300 years. *Journal of Glaciology* and Geocryology,2002,24(6):717~722
- 76 姚檀拣,秦大河,徐柏青等.冰芯记录的过去1000a 青藏高原温 度变化. 气候变化研究进展,2006,2(3):99~103 Yao Tandong,Qin Dahe,Xu Baiqing *et al.* Temperature change over the past millennium recorded in ice cores from the Tibetan Plateau. *Advance in Climate Change Research*,2006,2(3):99~103
- 77 Yadav R R, Park W K, Singh J et al. Do the Western Himalayas defy global warming? Geophysical Research Letters, 2004, 31 (17): L17201, doi: 17210.11029/12004GL020201
- 78 何元庆,张忠林,姚檀栋等.中国季风温冰川区近代气候变化与 冰川动态.地理学报,2003,58(4):550~558 He Yuanqing,Zhang Zhonglin,Yao Tandong *et al.* Modern changes of the climate and glaciers in China's monsoonal temperature-glacier region. Acta Geographica Sinica,2003,58(4):550~558
- 79 Cook E R, Krusic P J, Jones P D. Dendroclimatic signals in long tree-ring chronologies from the Himalayas of Nepal. International Journal of Climatology, 2003, 23(7):707 ~732
- 80 李晓文,周弄骥,李维亮等.四川地区近40年来的降温及其可能机制分析.见:曹鸿兴,李月洪,魏凤葵主编.我国短期气候变化及成因研究.北京:气象出版社,1996.103~109 Li Xiaowen,Zhou Nongji,Li Weiliang *et al.* The potential mechanism for temperature decrease of recent 40 years in Sichuan region In.

for temperature decrease of recent 40 years in Sichuan region. In: Cao Hongxing, Li Yuehong, Wei Fengkui eds. Short-term Climatic Change and It's Causes in China. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 103 ~ 109

TREE RING-BASED SUMMER TEMPERATURE RECONSTRUCTION OVER THE PAST 200 YEARS IN MIYALUO OF WESTERN SICHUAN, CHINA

Li Zongshan[®] Liu Guohua[®]* Zhang Qibing[®] Hu Chanjuan[®] Luo Shuzheng[®]

(①State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085;
 ②State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract

Several studies have previously been conducted in Western Sichuan and demonstrated the fidelity of tree-ring records to dendroclimatological research. However, climate variability of this region during past centuries still remains difficult to depict clearly, mainly due to the paucity of the high-resolution paleoclimatic evidence. Using tree-width data of *Sabina squamata* in Milyaluo, Western Sichuan of China, our objectives are to determine the main climate responses in diameter growth and seek to understand the regional climate variability within this ecological complex area.

The study area($31.4^{\circ} \sim 31.92^{\circ}N$, $102.58^{\circ} \sim 103.07^{\circ}E$) is situated in Miyaluo forest zone, in the watershed of Zagunao River(one of the major tributaries of the upper Min River). The sample site(31.63'N, $102.96^{\circ}E$) of *S. squamata* in this study is located in Jiabigou country. In total, we collected 45 cores from 45 living trees of *S. squamata* in a treeline site(3750m above sea level) at the southern slope side. Samples were dated and processed using basic dendrochronological techniques. A total of 38 increment cores were eventually crossdated and selected for chronology development, whereas seven poor quality cores(not cross-datable at the 99% significant level) were excluded from further analysis. Several statistics were used to identify common patterns of interannual growth variability, and correlation and response function analyses were used to determine the basic response patterns of radial growth to climate.

The result was a robust standard chronology (from 1785 to 2009 A.D.) with strong signal strength back to 1810 A. D., and with variability retained at the multi-decadal scale. Correlation and response analysis revealed that tree growth at this site was mostly governed by temperature in summer (June to July), and temperature from winter to early spring (prior December to current March) played a secondary role to explain the climate related variance in ring records. In contrast, no consistent response pastern was found between the chronology and precipitation. The summer (June to July) temperature reconstruction, spanning 1810 ~ 2008 A. D., could explain 43.2% the variance (adjusted for degrees of freedom was 41.9%) contained in the instrumental data from the calibration period 1955 ~ 2002 A. D. Three prominent stages can be identified in our reconstruction: a comparatively cold period prior to 1850 A. D., followed by a consistent temperature increase during the period of 1850 ~ 1950 A. D. and a near normal temperature state during the late half of 20th century. The extreme cold event occurred during 1810 ~ 1830, reaching minimum values during 1824 ~ 1825, while the most distinct warm event occurred at late half of the 19th century (1850 ~ 1903) and first half of 20th century (1911 ~ 1950), reaching maximum values in 1863 and 1925. The reconstruction revealed similarities at inter-decadal frequencies with tree-ring reconstructed temperatures from nearby regions, as well as the δ^{18} O value of ice cores and recorded glacier fluctuations in the surrounding high mountains, which suggested the fidelity of the local temperature sensitivity of our tree-ring data. This reconstruction will improve coverage and length of paleoclimatic data for Western Sichuan, and contribute to the fundamental information on large-scale climate variability of this remote region with short-term instrumental data.

Key words Temperature reconstruction, tree ring, Miyaluo, Western Sichuan Plateau