

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0059

ZOU Lili, XU Shanshan, ZHENG Chaogang, et al. Relationship between the tree ring width of *Sabina saltuaria* and climate factors in Haizi Mountain, Daocheng, Sichuan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3):917–927. [邹莉丽, 徐姗姗, 郑超刚, 等. 四川稻城海子山方枝柏树轮宽度与气候因子的响应关系研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3):917–927.]

四川稻城海子山方枝柏树轮宽度 与气候因子的响应关系研究

邹莉丽, 徐姗姗, 郑超刚, 李生芮, 连婉婧, 商志远,
张志刚, 孔兴功, 赵志军

(南京师范大学地理科学学院 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘 要: 对四川稻城县海子山高原上的方枝柏进行树芯采集, 经交叉定年后建立林线上限位置的方枝柏树轮宽度年表。标准化年表与气象资料的响应分析结果揭示了该地区树木生长主要受当年生长季前期温度条件的控制。轮宽指数与前一年9月到当年2月的平均气温呈显著正相关($R=0.56, P<0.01$)。由此重建了该地区1850—2019年这170 a的前一年9月到当年2月平均气温的变化, 转换函数方差解释量31.7%。重建结果与邻近地区树轮记录的温度变化具有较好的一致性。重建序列显示工业革命以来, 研究区经历较冷的时期有: 1870—1890年和1960—1980年; 较暖的时期有: 1884—1892年、1919—1925年、1940—1960年以及1980—2019年。1940—1960年是20世纪最暖的时期, 20世纪60年代后温度呈现下降趋势, 1980年开始气温保持持续升高, 2010年之后气温有小幅下降。重建气温序列与太阳黑子数变化和北大西洋年代际涛动AMO有较强的响应, 揭示了太阳活动、海温等因子可能对该区温度变化产生重要影响。

关键词: 树木年轮; 温度重建; 林线; 方枝柏; 稻城

中图分类号: Q948.112⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)03-0917-11

0 引言

“气候变率和可预报性研究”是国际地圈-生物圈计划中“过去全球变化”(PAGES)的核心内容, 旨在描述和定量评估气候驱动机制、变化规律以及人类对气候的影响, 增强未来几十年甚至几百年气候变化的可预报性, 以应对未来可能出现的环境与发展问题^[1-3]。过去气候历史重建, 尤其是百年或千年尺度高分辨率气候历史重建, 是增强气候可预报性的关键。树木年轮宽度记录具有较高的时间分辨率和准确性, 且可与器测资料有效校准和衔接^[4-5], 因此是研究年代际气候变率的理想指标。川西高原是我国针叶林分布最为广泛的区域之一, 同时地处全球气候变化的敏感区域, 自二十世纪开始树

木年轮气候学研究已逐步展开, 目前已经建立了许多树轮年表^[6-9]。但目前来看, 重建的气候因子较为单一, 多为夏季温度; 此外, 采样点分布海拔位置较低, 年表易受到非气候信息的干扰。本文利用在川西海子山地区采集的优势树种——方枝柏树轮样本及所收集的气象资料, 探讨森林分布上限树木生长与气候因子的响应关系; 同时重建该区高分辨率的气温变化, 并分析温度变化的特征和驱动因子, 以期今后利用树木年轮深入开展该区域气候、生态环境等研究奠定数据基础。

1 研究区概况

稻城海子山(29°02′~30°08′ N, 100°48′~100°30′ E)处于青藏高原东南缘, 横断山区的沙鲁里山南段

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-06-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)“气候变化影响下亚洲水塔变化及其影响与绿色发展方案”(XDA20100300); 国家自然科学基金项目(41971009)资助

作者简介: 邹莉丽, 硕士研究生, 主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: zoulilian@hotmail.com

通信作者: 商志远, 高级实验师, 主要从事树木年轮气候学研究. E-mail: shangzy@njnu.edu.cn

(图1)。受青藏高原复杂地形的影响,以及印度洋西南季风和中纬度西风的交替控制,该地区呈现出独特的大陆高原型季风气候特征^[10]。气温年(日)较差大,年平均气温 4.58℃,6—8月平均气温 12℃,11月—次年2月平均气温降至 0℃以下,年降

水总量 635 mm,6—9月降水量占年降水量的 87.1%(图2)。稻城海子山位于海拔 4 000~5 000 m 的高山地带,在末次冰期曾发育冰帽,面积超过 3 000 km²,是青藏高原发现的最大的古冰帽地区之一。

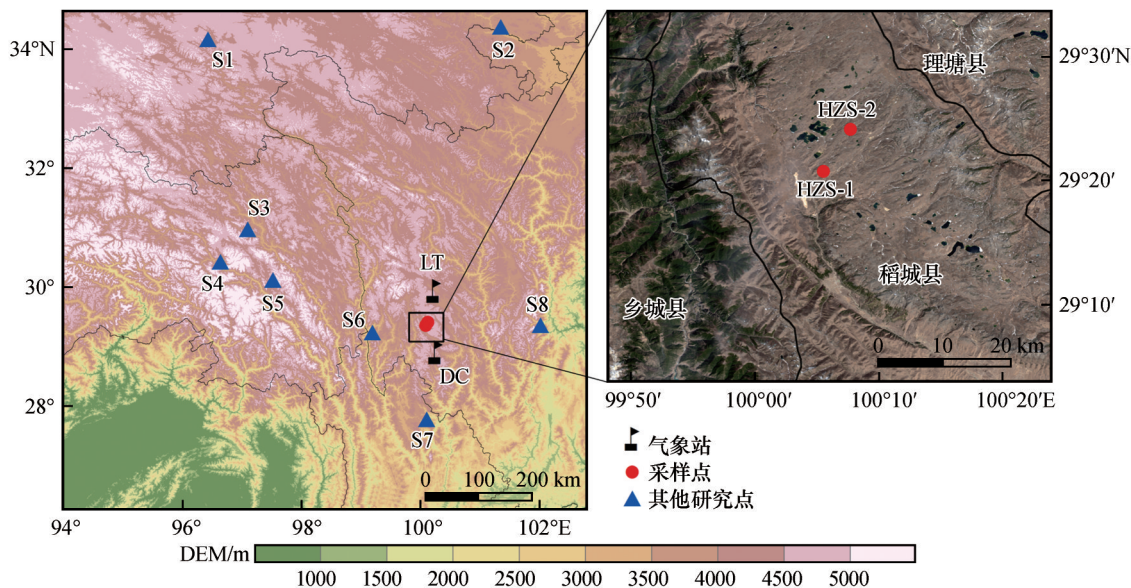


图1 树轮采样点及邻近气象站位置图。红点表示本研究采样点,旗帜表示稻城(DC)和理塘(LT)气象站,蓝色三角形(S1~S8)表示其它研究采样点^[12-19]

Fig. 1 Map showing the location of the tree-ring sampling sites and nearby meteorological stations. Red dots represent the tree-ring sites in this study. Flags represent Daocheng (DC) and Litang (LT) meteorological station. Blue triangles (S1~S8) represent the tree-ring sites of other studies^[12-19]

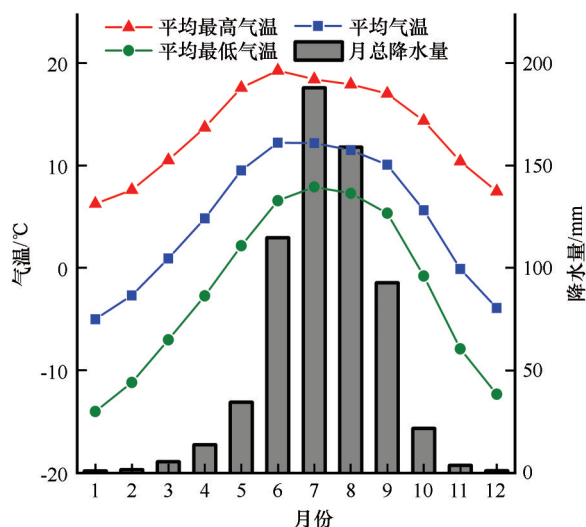


图2 稻城海子山地区温度和降水月变化

Fig. 2 Monthly variations of temperature and precipitation in the Haizi Mountain

受末次冰川活动的影响,区域内以流石滩疏生植被为代表,在海拔 4 500~4 700 m 的高原面,方枝柏(*Sabina saltuaria*)以孤立木或小斑块状分布其

上^[11]。这些方枝柏具有开放的冠层条件,受人类活动干扰少,能敏感地响应区域的气候变化。本研究分别于 2019 年 5 月和 2020 年 7 月在海子山高原面上的 2 个采样位置 HZS-1 (29.35° N, 100.10° E) 和 HZS-2 (29.41° N, 100.13° E) 进行树芯采样。两次采样共采集 43 株树 103 根样芯。采样树木均为活树,每棵树采集 1~2 个样芯。本研究采样点以及附近其他研究采样点分布见图 1,采样信息见表 1。

2 数据与方法

2.1 树轮年表的建立

按照国际通用规范 and 标准^[3]对样品进行风干、固定和打磨预处理。所有样品的宽度测量均采用 LINTAB™ 6 年轮分析系统(Rinntech 公司,德国)进行量测,测量结果输入到 TSAP-WIN 标准年轮分析软件中进行辅助交叉定年,并结合 COFECHA 程序^[20]对宽度测量和交叉定年结果进行质量检验和控制。通过 ARSTAN 程序^[21],采用序列长度 67% 的三次样条函数剔除树轮生长趋势,建立 STD、RES

表1 采样点基本信息统计表

Table 1 Basic information of the sampling sites

编号	采样时间	芯/树	平均树龄/a	最长时间跨度	海拔/m	纬度/N	经度/E	坡度	坡向
HZS-1	2019-05-17	30/13	280	1451—2018年	4 400~4 600	29. 20°	100. 05°	10°~20°	南
HZS-2	2020-07-26	73/30	365	1114—2019年	4 500~4 600	29. 25°	100. 08°	17°~40°	南

和ARS三种年表。由于STD年表保留了去除生长趋势之后更多的气候信号,既含有较多的高频信号,也包含丰富的低频信号,因此本文采用STD年表来进行树木年轮-气候响应分析。以50 a为区间,25 a为滑动时段,计算年表的样本解释信号强度(EPS),EPS>0.85的第一年为可靠年表的起始年份;计算平均敏感度(MS)、标准差(SD)、一阶自相关系数(AC)来评估重建年表的质量和信号强度。此外,对1850—2019年时段进行了公共区间分析,计算了信噪比(SNR)、第一主成分方差解释量(PC1)以及EPS等,来检验年表所含有区域气候信号强度。上述工作在南京师范大学地理科学学院树轮实验室完成。

2.2 气象资料

采样点邻近气象站有稻城气象站和理塘气象站(图1)。稻城站(29.03°N, 100.18°E, 3 728 m a. s. l.)气象记录覆盖1957—2019年;理塘站(30.00°N, 100.16°E, 3 948 m a. s. l.)气象记录覆盖1953—2019年。通过对比两个台站气温和降水年内和年际的变化趋势,发现两个台站气象记录具有同质性。分别计算稻城站和理塘站气象要素以及两个台站气象要素平均值与树木年轮年表的相关关系,发现树轮年表对稻城站气象资料的响应更强。因此,统计稻城气象站1957—2019年的月平均气温、平均最高气温、平均最低气温和月总降水量作为气象资料用于分析。采用滑动T检验和Mann-Kendall方法^[22]来检测气温和降水时间序列是否发生均值突变,相关检验过程通过MATLAB软件实现。

2.3 树轮-气候关系统计分析

选择四个气象要素的单月以及多个相邻月份的组合平均值作为气候候选因子,考虑到树木生长的滞后效应,选择前一年1月到当年12月共计24月,分析时段1959—2019年。利用Pearson相关分析方法计算标准宽度年表序列和上述气象要素之间的相关关系,确定树木生长的主要限制因子和重建因子。利用回归分析方法建立方枝柏宽度年表与重建因子的简单线性回归方程,并对回归方程和重建结果进行可靠性检验,常用的检验指标有方差

解释量 R^2 、符号检验ST、误差缩减值RE和乘积平均值检验 t 等。其中,符号检验用于检验实测和重建序列与各自距平值之间符号的一致性^[23];乘积平均值检验是在符号检验的基础上,进一步考虑两序列在各自距平值之间符号和数值的大小^[23];误差缩减值RE>0,表示重建方程可靠,RE≥0.3表示较好的通过检验,其公式^[23]表示为:

$$RE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中: y_i 为实测值; \hat{y}_i 为重建值; \bar{y} 为实测序列平均值; n 为检验时段长度。

3 结果

3.1 树轮年表及其统计量

各序列与主序列平均相关系数0.389,平均敏感度0.198,平均序列长度322 a,平均缺轮率1.56‰,在此基础上建立稻城海子山地区方枝柏标准年轮年表。图3展示了树轮指数序列、样本量、Rbar和EPS随时间的变化。Rbar平均值0.13,EPS大于0.85的起始年份为1645年,其后部分时段低于临界值0.85。本文选择初步报道比较可靠的时段1850—2019年,分析工业革命之后人类活动显著影响下树轮-气候的响应关系。1850—2019年公共时段分析显示,第一主成分方差解释量34.4%,信噪比为7.988,平均EPS为0.889,样本的总体代表性较好。年表具有较高的平均敏感度(MS)、标准差(SD)和信噪比(SNR),表明方枝柏对环境变化比较敏感,年表含有较丰富的气候信号(表2)。

3.2 树轮年表与气候要素的响应关系

稻城海子山方枝柏径向生长与气温呈现明显的正相关,而与降水没有表现出明显的相关关系(图4)。其中,STD年表与平均气温、平均最低气温响应都较好,相关性较好的月份主要分布在前一年1到4月及前一年9月到当年4月。年表与前一年1月、4月、11月和当年1月平均气温相关系数分别为0.52、0.47、0.43和0.53,呈较显著的正相关关系($P<0.01$);与前一年1月、前一年4月、当年1月和当年2月的平均最低气温呈显著正相关($P<0.01$),相

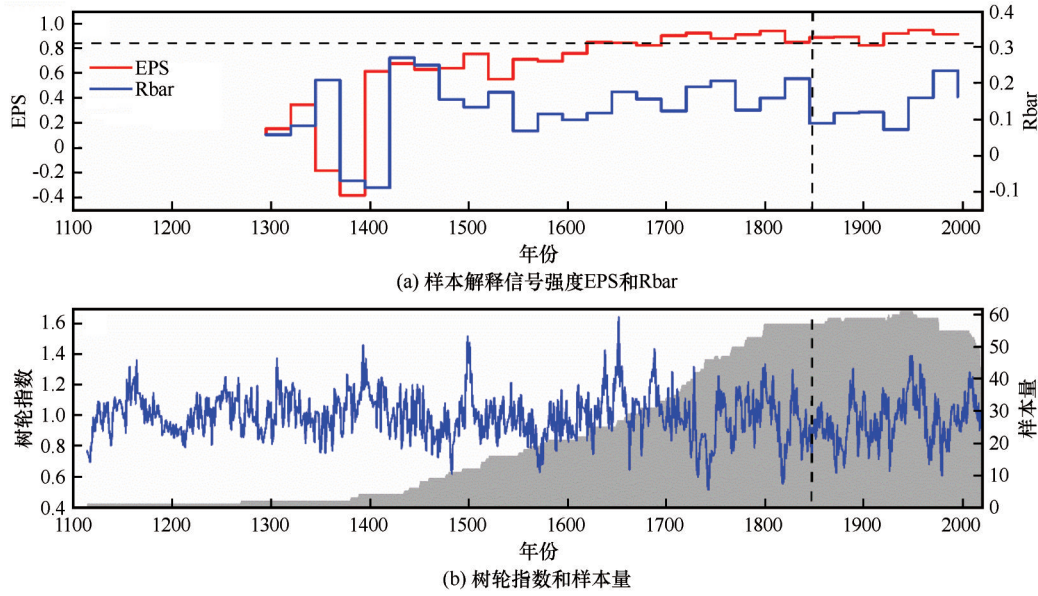


图3 海子山方枝柏标准年轮年表及其统计量
Fig. 3 Standard tree-ring width chronology of *Sabina saltuaria* and its statistics: expressed population signal (EPS) and Rbar (a), tree-ring width index and sample depth (b)

表2 年表统计特征及公共区间分析结果
Table 2 Standard tree-ring chronology statistics

年表统计特征				公共区间分析(1850—2019年)			
时段	MS	SD	AC	T/C	SNR	PC1	EPS
1645—2019年	0.110	0.151	0.585	34/56	7.988	34.4%	0.889

注：MS (mean sensitivity) 为平均敏感度；SD (standard deviation) 为标准差；AC (auto-correlation) 为一阶自相关系数。T/C 为公共时段内树和芯的个数；SNR (signal-noise ratio) 为信噪比；PC1 为第一主成分方差解释量 (%)；EPS (expressed population signal) 为样本解释信号强度。

关系数分别为 0.52、0.44、0.50 和 0.47。年表与平均最高气温相关性较弱,仅与前一年 11 月存在较显著的相关性($R=0.37, P<0.01$)。降水在本区对树木径向生长的限制性较弱,年表与降水没有明显的响应关系。

进一步分析方枝柏宽度年表与平均气温、平均最低气温的响应关系,选择双月、三个月、六个月、八个月及十二个月的多个月份组合平均值作为气候因子。图 5 给出了年表与气温多月组合均值的相关分析结果。树木径向生长对平均气温变化响应的“滞后效应”明显,与年表相关性较强的月份组合主要分布在从前一年起始的六个月、八个月、十二个月份的组合。年表与前一年 9 月到当年 2 月平均气温($R=0.56, P<0.01$)、前一年 6 月到当年 1 月平均气温($R=0.57, P<0.01$)、前一年 4 月到当年 3 月平均气温($R=0.58, P<0.01$)的相关性较强,均达到 99% 的置信度水平。另一方面,年表与平均最低气温的相关性弱于平均气温,与当年生长期开始之前的 1 月到 2 月平

均最低气温相关性最强,相关系数为 $R=0.51 (P<0.01)$,说明生长期到来之前的最低气温对树木生长限制作用明显;与前一年 10 月到当年 3 月的平均最低气温、前一年 9 月到当年 3 月的平均最低气温相关系数分别为 0.48、0.49,在 99% 置信度水平上显著正相关。

3.3 气温重建与检验

相关分析结果显示,方枝柏树轮宽度年表与前一年 9 月到当年 2 月平均气温具有显著的正相关关系($R=0.56, P<0.01$),前一年生长季末期到当年生长季开始之前的平均气温对本区树木生长的限制作用显著,响应关系符合树木生长的生物学特征。因此,利用方枝柏树轮宽度年表重建 1850—2019 年 170 a 的前一年 9 月到当年 2 月的平均气温。年轮指数与平均气温的转换函数方程为:

$$MT_{p9-c2} = 3.468 \times STD - 2.672 \tag{2}$$

式中: MT_{p9-c2} 表示前一年 9 月到当年 2 月的平均气温;STD 是标准化年表序列。该模型对观测时段

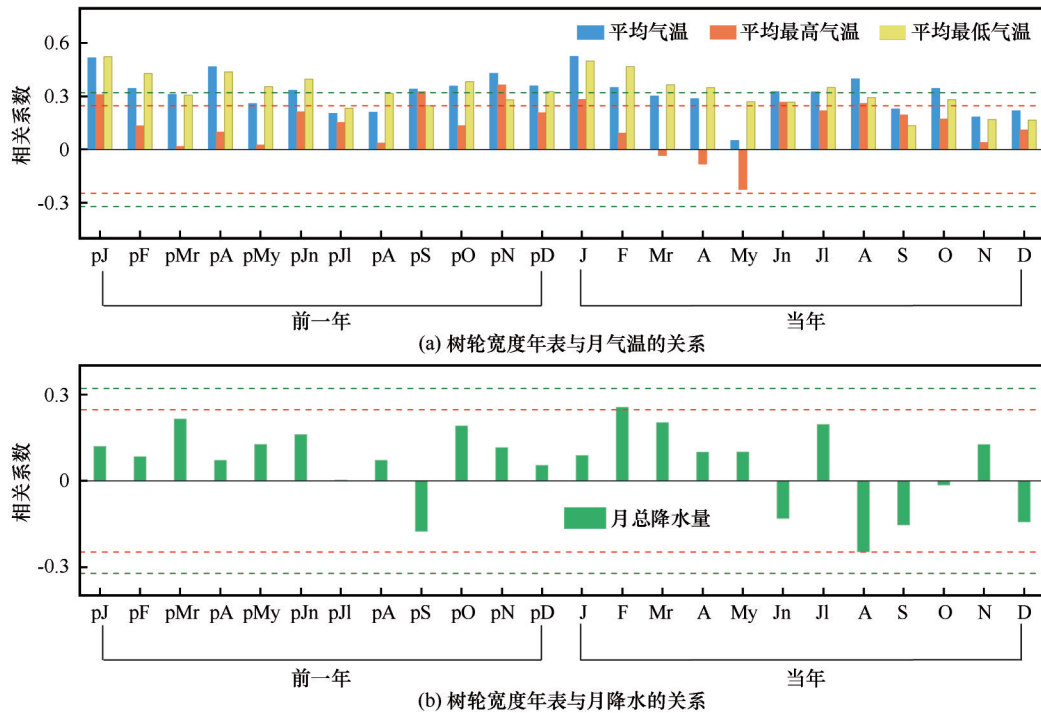


图4 方枝柏树轮宽度年表与月气温(a)和降水(b)的关系

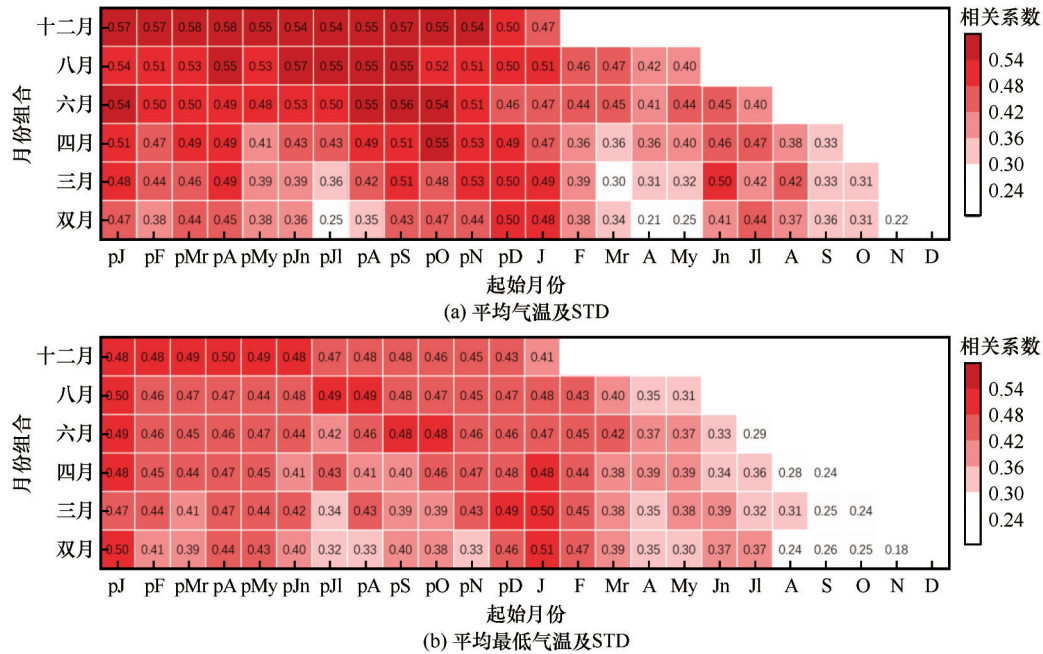
Fig. 4 Correlation coefficients between the tree-ring widths of *Sabina saltuaria* and monthly temperature (a) (monthly mean temperature, mean maximum/minimum temperature), and monthly precipitation (b)

图5 方枝柏树轮宽度年表与多月组合平均值平均气温(a)和平均最低气温(b)的相关关系

Fig. 5 Correlation coefficients between tree-ring widths of *Sabina saltuaria* and monthly consecutive combinations of mean temperature (a), and mean minimum temperature (b)

1959 年到 2019 年间平均气温的方差解释量为 31.7%, 调整自由度后的方差解释量为 30.5% (表 3)。由此方程重建出稻城海子山地区工业革命以来的气温图 6(c)。

重建序列和实测序列在公共时段 1959—2019 年的对比如图 6(a)所示, 可以发现两者的低频变化趋势总体上是吻合的, 拟合程度较好 ($R=0.56$, $P<0.01$), 2010 年之后的响应较不稳定, 可能是由于

2015—2018年实测记录气温陡然升高导致了这一时段响应的不敏感。为了进一步比较重建序列与实测序列在高频变化上的一致性,我们进行了一阶差分处理,获得更加平稳的重建和实测序列[(图6(b))。从图中可以发现两者同步性较好($R=0.31$,

$P<0.01$)。利用统计参数对重建方程进行可靠性检验,其中,方差解释量 R^2 为31.7%,误差缩减值RE为0.31,乘积平均值检验 t 为6.7。相关统计量均通过显著性检验,重建结果稳定可靠,重建的温度序列可以代表一般意义上的气温变化(表3)。

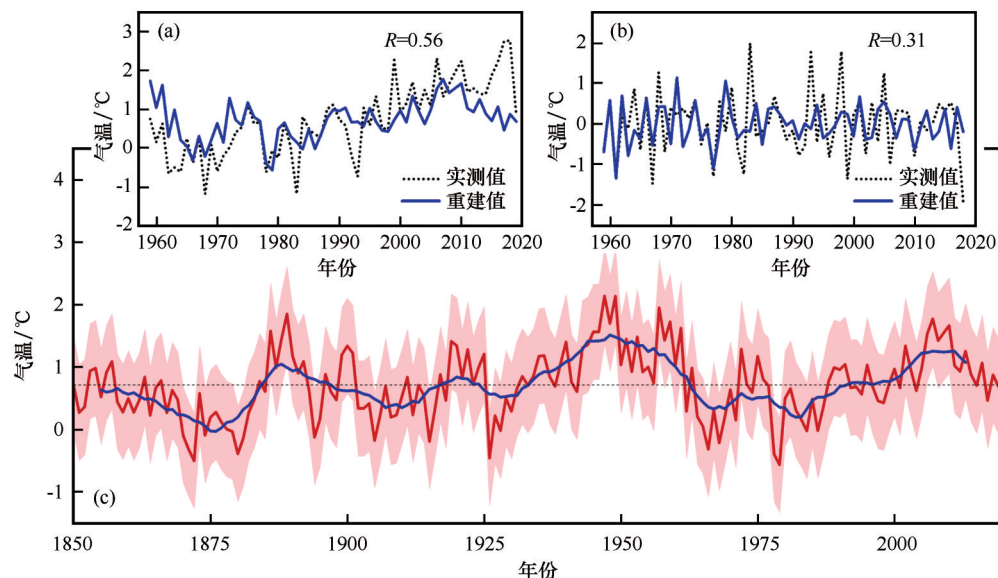


图6 气象站实测气温与重建气温在公共时段(1959—2019年)对比(a);实测气温与重建气温的一阶差分对比(b);稻城海子山平均气温(MT_{p9-c2})重建序列(c),其中红线表示原序列,蓝线表示11 a低通滤波值,橙色阴影表示均方根误差

Fig. 6 Comparison of the observed and reconstructed temperature during 1957—2019, raw data (a); the first-order difference data (b); variations of the reconstructed MT_{p9-c2} (c), red line indicates the raw data, blue line indicates the 11-year smoothing value and orange shadow indicates the RMSE

表3 重建方程的可靠性检验结果

Table 3 The validation of the reconstructed temperature

时段	方差解释量	符号检验	一阶差分符号检验	误差缩减值	乘积平均值检验
1959—2019年	31.7%	45/16	33/27	0.31	6.7

3.4 温度重建序列的变化特征

图6(c)为重建的1850年工业革命以来前一年9月到当年2月平均气温变化及11 a滑动平均结果,重建序列平均值 0.7°C ,均方根误差(RMSE)为 0.7°C 。从图中可以看出,重建序列中较冷的年份有1871年(-0.3°C)、1872年(-0.5°C)、1880年(-0.4°C)、1915年(-0.2°C)、1926年(-0.5°C)、1966年(-0.3°C)、1978年(-0.4°C)、1979年(-0.6°C);较暖的年份有1886年(1.6°C)、1889年(1.9°C)、1947年(2.1°C)、1949年(2.1°C)、1959年(1.7°C)、2007年(1.8°C)、2010年(1.9°C)。

从低频变化看,较冷的时期有:1870—1890年和1960—1980年;较暖的时期有:1884—1892年、1919—1925年、1940—1960年以及1980—2019年。

1850—1880年呈现明显的降温趋势,之后气温波动上升,1940—1960年达到峰值,1960—1980是20世纪的较冷时期,1980年之后气温持续上升,2010年之后气温有小幅下降。

4 讨论

4.1 树木生长与气候的响应关系

树轮宽度指数与气候要素的相关分析结果表明,稻城海子山方枝柏树木生长与前一年9月到当年2月的平均气温响应较好($R=0.56$, $P<0.01$)。本研究采样于海拔4 500~4 700 m的森林上限,降水较多,而温度较低,温度对树木生长的限制作用强,前人的研究表明高海拔地区树轮宽度较好的指示气温变化^[24-26]。本区常年气温偏低,1月平均气温

-5℃, 7月平均气温 12.2℃(图 2), 在低温的抑制作用下, 前一年生长季末期到当年生长季前期营养物质的积累对当年树木的生长至关重要, 由此体现出气温的“滞后效应”明显。Fritts^[27]指出在特定区域或地点, 统计模型中的树木生长预测因子可能滞后于特定气候变量出现的一年或多年时间。诸多研究也表明青藏高原地区树木的生长有可能会受控于前一年的温度^[12, 18, 28]。另外, 从木材解剖学的角度, 树木生长受前一年气候条件的影响强烈, 可体现为早材结构清晰, 比例较多, 而晚材比例较少, 本研究的方枝柏样芯中可以发现这一特征。当然, 树木生长是多种因素综合作用的结果, 其宽窄变化取决于气候、水文、土壤、地形地貌等自然因素的直接作用以及人类活动的间接影响, 尤其是工业革命以来人类活动对自然环境的影响剧烈, 图 6(b) 显示 2010 年之后本文重建结果呈现小幅的下降趋势, 而实测记录则显示显著的升温趋势, 这一分异显示了重建结果的稳定性和器测记录中气候信号的单纯性之间的混合关系, 因此如何从器测记录中剥离人

类活动影响的信号值得深入探讨和研究。

4.2 温度变化的特征分析

将本文重建序列与青藏高原东南部其他气温重建序列进行对比, 以进一步验证本文重建结果的可靠性, 探讨气温变化的共同特征(图 7)。Liang 序列^[14]基于冷杉树轮宽度记录了当年 6 月到当年 9 月的夏季平均气温, Huang 序列^[29]基于西藏圆柏树轮宽度记录了前一年 11 月到当年 2 月的冬季最低气温。从低频变化上看, 本研究与上述两序列具有较高程度的一致性: 1900—1925 年以及 1960—1980 年为明显的共同冷期; 1940—1960 年以及 1980—2019 年为明显的共同暖期。1870—1890 年各序列存在一定的趋势分异, 本文重建气温呈现负异常, 1872 年、1880 年平均气温(MT_{p9-c2})分别为 -0.5℃, -0.4℃, 而 Liang 和 Huang 序列在这一时段总体偏暖, 表现气温的正异常。重建气温序列中 1940—1960 年表现为 20 世纪以来最温暖的时期, 其升温幅度甚至超过现代暖期[图 7(a)]。早期中国近百年气温序列研究显示, 中国经历两次的年代际气温变

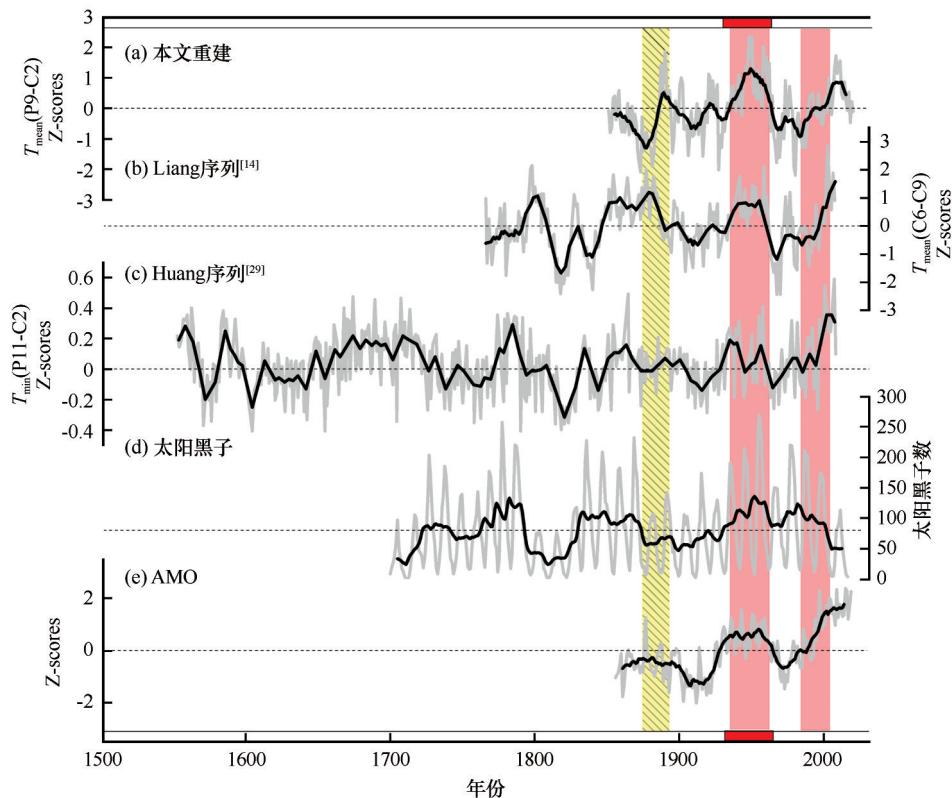


图 7 重建序列(a)与青藏高原东南部其他气温重建序列对比(b, c), 重建序列与太阳黑子(d)和AMO(e)变化对比, 黑线为 11 a 低通滤波值

Fig. 7 Comparison of the reconstructed mean temperature (a) in this study with others temperature records in southeastern Tibetan Plateau (b, c), the instrumental recorded sunspot numbers (d) and AMO (e) over their common period, the black line indicates 11-year lowpass filtering value

暖,分别发生在20世纪30到40年代和80年代中期以后^[30-32]。林学椿在1995年指出,相比于北半球平均温度40年代低于80年代,中国表现为40年代要高于80年代,40年代气温异常偏暖^[32]。然而近年来,随着更全面观测资料的获取和代用指标的应用,有研究认为40年代中国冷/暖格局分布并不一致或不存在明显的“偏暖”^[33-34]。尽管中国近百年气温序列仍然存在不确定性,作为全球变化最为敏感的区域之一,青藏高原地区树木年轮所记录的1940s—1960s年代气候变化显著偏暖。

气候变化受气候系统内部因子(如海气/陆气相互作用等)与外部因子(如轨道强迫、太阳活动、人类活动等)的共同作用^[35]。功率谱分析结果显示,前一年9月到当年2月平均气温在95%置信水平上表现出56 a的长周期和2~3 a的短周期(图8),其中56 a周期与太阳黑子50 a周期^[36]和海气系统年代际震荡^[37-47]密切相关。北大西洋(0~70°N)海域海表温度的多年代际震荡(AMO)在解释20世纪北半球平均温度的多年代变率中发挥至关重要的作用^[38]。本文重建气温与AMO呈显著相关($R=0.33$, $P<0.01$)。同时,AMO的暖/冷位相和重建气温的正/负异常对应非常一致。AMO在1940—1960年处于暖位相,而气温相对偏暖波动,表明AMO可能是这一时期偏暖的直接原因[图7(e)]。尽管目前关于亚洲气温异常变动如何响应AMO尚不完全清楚,但可能的响应机制是AMO通过对东亚季风系统的影响从而驱动亚洲气温异常的变动。在AMO暖位相时,中纬度的西风带加强^[39],欧亚大陆中上对流层偏热,东亚夏季风得到加强而冬季风得以削弱^[37-43],欧亚大陆的大部分地区,特别是中国西部地区温度平均偏高^[40];此外,夏季AMO暖位相引起热

带太平洋位势高度正异常以及强副热带反气旋,从而加强东亚夏季风;冬季,AMO暖位相会引起中纬度西风加强,从而导致来自北大西洋的地面低压延伸到欧亚大陆,这些变化在一定程度上削弱了西伯利亚—蒙古冷高压系统和东亚冷空气活动,降低了东亚冬季风的强度^[37-46],因而AMO的暖冷位相与东亚地区温度的增减存在相关性。综上所述,虽然目前具体机制还不明确,但与前人代表性观点^[38,47]一致,本研究表明,大西洋表面温度异常在影响青藏高原东南部高海拔地区的气温变动中起着重要作用,而影响程度和影响机制等问题仍需在今后的研究中进一步探讨。

太阳活动是气候系统最为重要的外部驱动力之一^[36]。树木年轮气候学研究中发现一些由太阳活动驱动而形成的共同的冷暖期,如Maunder(1645—1715年)和Dalton(1780—1830年)太阳活动极小期对应气温较冷时期;Modern(1930—1970年)太阳活动极大期对应气温较暖时期^[48-49]。将太阳黑子数变化序列与本研究重建结果对比,1940—1960年气温异常暖期为近百年太阳黑子数高值时期;1876—1930年是太阳黑子数低值时期,而重建气温在这一时段偏冷,分为1870—1890年及1900—1925年两个冷期;1966年为20世纪最暖时期之后的第一个低温极值年,太阳黑子数在1966年左右出现小幅降低。以上在一定程度上说明了高海拔地区气温的变化对太阳黑子数周期变化的敏感响应。然而,观测记录显示1980年以来太阳黑子数下降,重建温度却呈现持续上升的反向趋势。这一现象可能是由于大气中CO₂等温室气体的浓度升高使全球气候持续增暖所致^[50]。这在一定程度上说明了自20世纪末期开始人类活动对气候变化的影响加剧。当然这一反向趋势,也有可能由其他因素所导致,今后需要对此加以深入研究。值得注意的是,太阳活动是树木生长重要的外部气候强迫,同时太阳活动也可通过影响宇生核素的大气生产率而影响树木的同位素组成^[51-53],目前越来越多的研究基于高分辨率的树木年轮¹⁴C记录来揭示太阳活动的变化规律^[51-53]。

5 结论

(1)在海子山地区高海拔4 500~4 700 m的森林分布上限,树木生长主要受气温的限制,与平均气温相关性最强,其次是平均最低气温。研究显示,本地区方枝柏树轮宽度年表与前一年生长季末期

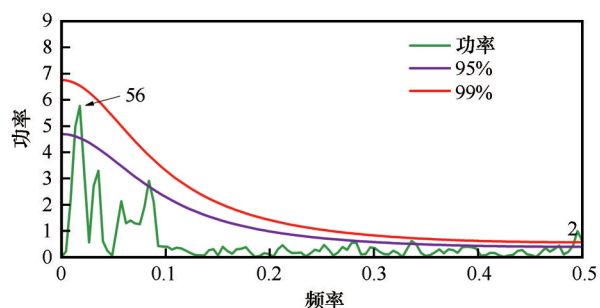


图8 平均气温重建序列功率谱分析图,95%(紫线)和99%(红线)置信水平,图中数字56、2为周期

Fig. 8 Power spectrum of the reconstructed mean temperature, with 95% (purple line) and 99% (red line) confidence level, the number 56 and 2 in the picture represents the period

到当年生长季前期平均气温(MT_{p9-c2})相关性显著($R=0.56$, $P<0.01$);

(2)基于方枝柏树轮宽度年表重建1850—2019年这170 a的前一年9月到当年2月平均气温,重建效果较好。重建结果显示,工业革命以来,研究区经历较冷的时期有:1870—1890年和1960—1980年;较暖的时期有:1884—1892年、1919—1925年、1940—1960年以及1980—2019年。1940—1960年是20世纪最暖的时期,60年代开始温度出现下降,1980年开始气温持续升高,2010之后气温有小幅下降;

(3)重建气温序列与太阳黑子数变化和北大西洋年代际涛动(AMO)有较强的响应,揭示了太阳活动、海温等因子可能对该区温度变化产生重要影响。但由于本文进行的是单点的宽度年表建立,在海拔梯度以及空间分布密度上都略显不足,需要今后进一步采集更多样本,以深入探究区域气候变化的特征和相应的驱动机制。

谨以此文,纪念李吉均先生!作者之一赵志军有幸跟随先生攻读博士学位,期间于1998年随先生经川藏线进藏。途中,先生重返稻城古冰帽区考察,讲到高原面上有柏树,是做树轮的好材料。孰想弟子愚钝,落实先生指示已是二十余年之后。

致谢:衷心感谢稻城县林业和草原局自然保护地管理股毛天翔股长在采样过程中提供的支持。

参考文献(References):

- [1] Wang Shaowu. Cross-scientific issues in the PAGES plan and the CLIVAR plan [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 4(6): 23-30. [王绍武. PAGES计划与CLIVAR计划中的交叉科学问题[J]. *气象学报*, 1997, 4(6): 23-30.]
- [2] Wu Kunpeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin. Glacier variation and its response to climate change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(4): 1115-1125. [吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦. 1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(4): 1115-1125.]
- [3] Du Jun, Niu Xiaojun, Yuan Lei, et al. Climatic and environmental features in Chang Tang National Nature Reserve during 1971—2017 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 1017-1026. [杜军, 牛晓俊, 袁雷, 等. 1971—2017年羌塘国家级自然保护区陆地生态环境变化[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 1017-1026.]
- [4] Qi Chengjing, Zhao Yunlin, Yu Xunlin, et al. Overview of Dendrochronology [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2017, 37(3): 1-8. [祁承经, 赵运林, 喻勋林, 等. 树木年轮学综论[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(3): 1-8.]
- [5] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree-ring dating [M]. University of Arizona Press, 1968.
- [6] Guo Mingming, Zhang Yuandong, Wang Xiaochun, et al. The effects of sudden temperature increase on the growth of Maerkang trees in western Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7464-7474. [郭明明, 张远东, 王晓春, 等. 升温突变对川西马尔康树木生长的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(22): 7464-7474.]
- [7] Li Zongshan, Liu Guohua, Gong Li, et al. Tree ring-based temperature reconstruction over the past 186 years for the Miyalu Natural Reserve, western Sichuan Province of China [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2015, 120(3/4): 495-506.
- [8] Li Zongshan, Liu Guohua, Zhang Qibing, et al. Using tree-ring width data to reconstruct the summer temperature changes in the Wolong area of western Sichuan in the past 159 years [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(6): 14-27. [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[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 14-27.]
- [9] Xiao Dingmu, Qin Ningsheng, Li Jinjian, et al. Changes in the July average maximum temperature of Seda in Western Sichuan as indicated by the tree-ring width [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1536-1543. [肖丁木, 秦宁生, 李金建, 等. 树轮宽度指示的川西色达7月平均最高气温变化[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1536-1543.]
- [10] Bao Lang, Wang Nan, Ni Zhiyao, Lu Tao. The influence of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau on the climate in Southwest my country: a study from the perspective of monsoons [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(5): 444-454. [包浪, 王楠, 倪志耀, 卢涛. 青藏高原隆升对我国西南地区气候的影响——从季风角度研究[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(5): 444-454.]
- [11] Yin Xueming, Zhao Fang, Wu Jie, et al. Main vegetation types in Yading Nature Reserve, Daocheng, Sichuan [J]. *Sichuan Forestry Science and Technology*, 2013, 34(4): 50-54. [尹学明, 赵芳, 伍杰, 等. 四川稻城亚丁自然保护区主要植被类型[J]. *四川林业科技*, 2013, 34(4): 50-54.]
- [12] He Minghui, Yang Bao, Datsenko N M. A six-hundred-year annual minimum temperature history for the central Tibetan Plateau derived from tree-ring width series [J]. *Climate Dynamic*, 2014, 43(3/4): 641-655.
- [13] Gou Xiaohua, Chen Fahu, Jacoby G, et al. Rapid tree growth with respect to the last 400 years in response to climate warming, northeastern Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(11): 1497-1503.
- [14] Liang E Y, Shao X M, Xu Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 98(1): 9-18.
- [15] Keyimu M, Li Zongshan, Liu Guohua, et al. Tree-ring based minimum temperature reconstruction on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 251: 106712.
- [16] Duan Jianping, Zhang Qibin. A 449-year warm season temperature reconstruction in the southeastern Tibetan Plateau and its relation to solar activity [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(20): 578-592.
- [17] Liang Hanxue, Lyu Lixin, Wahab M. A 382-year reconstruction of August mean minimum temperature from tree-ring maximum latewood density on the southeastern Tibetan Plateau, China [J]. *Dendrochronologia*, 2016, 37: 1-8.
- [18] Li Teng, Li Jinbao. A 564-year annual minimum temperature reconstruction for the east central Tibetan Plateau from tree rings [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 165-173.
- [19] Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on west Sichuan pla-

- teau as reconstructed from ring widths of dragon spruce [J]. *Quaternary Science*, 1999, 1: 81-89.
- [20] Holmets R L. computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, (44)3: 69-75.
- [21] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization[D]. USA: University of Arizona, 1985.
- [22] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [23] Lu Xiaoming. Study on the tree ring width chronology of *Pinus sylvestris* and its indication of dryness and wetness[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2007. [陆小明. 樟子松树轮宽度年表及其干湿指示意义研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2007.]
- [24] Li Jinjian, Shao Xuemei, Li Yuanyuan, et al. The relationship between the early summer temperature change in the northern part of the Western Sichuan Plateau from 1854 to 2010 and the annual mean sea surface temperature[J]. *China Desert*, 2015, 35(4): 1024-1035. [李金建, 邵雪梅, 李媛媛, 等. 1854—2010年川西高原北部初夏气温变化与全年平均海表温度关系初探[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 1024-1035.]
- [25] Xiao Dingmu, Qin Ningsheng, Huang Xiaomei. The average temperature change from July to August in the northern Sichuan Plateau recorded by tree rings in the past 325 years[J]. *Quaternary Research*, 2015, 35(5): 1134-1144. [肖丁木, 秦宁生, 黄小梅. 树轮记录的川西高原北部过去325年7—8月平均气温变化[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(5): 1134-1144.]
- [26] Hong Yin, Li Mingyong. Huang Lei. Summer mean temperature reconstruction based on tree-ring density over the past 440 years on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2020, 571: 1-8.
- [27] Fritts H C. Tree ring and climate[M]. New York: Academic Press, 1976.
- [28] Wang Qixiang, Fan Xiaohui, Wang Mengben. Recent warming amplification over high elevation regions across the globe [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(1/2): 87-101.
- [29] Huang Ru, Zhu Haifeng, Liang Eryuan, et al. A tree ring-based winter temperature reconstruction for the southeastern Tibetan Plateau since 1340 CE[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5): 3221-3233.
- [30] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi, et al. Establishment of China's annual temperature series in the past 100 years[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 4(4): 9-18. [王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. *应用气象学报*, 1998, 4(4): 9-18.]
- [31] Tang Guoli, Ren Guoyu. Re-analysis of China's surface temperature change trend in the past 100 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 4(4): 791-798. [唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. *气候与环境研究*, 2005, 4(4): 791-798.]
- [32] Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. Temperature series in China in the past 100 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 4(5): 525-534. [林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列[J]. *大气科学*, 1995, 4(5): 525-534.]
- [33] Tong Xuan, Yan Zhongwei, Li Zhen, et al. The cold and warm advection backgrounds of two interdecadal climate warming in China in the past 100 years[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(4): 64-75. [童宣, 严中伟, 李珍, 等. 近百年中国两次年代际气候变暖中的冷、暖平流背景[J]. *气象学报*, 2018, 76(4): 64-75.]
- [34] Yan Zhongwei, Ding Yihui, Zhai Panmao, et al. Reassessment of China's climate warming trend in the past 100 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3). [严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. *气象学报*, 2020, 78(3).]
- [35] Peng Youbing. A simulation study on the influence of external and internal factors of the climate system on climate change in the past millennium[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. [彭友兵. 气候系统外部因子和内部因子对过去千年气候变化影响的模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.]
- [36] Zhao Xinhua, Feng Xueshang. The periodicity and correlation between solar activity and the change of earth surface temperature[J]. *Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1284-1292. [赵新华, 冯学尚. 太阳活动与地球表面温度变化的周期性和相关性[J]. *科学通报*, 2014, 59(14): 1284-1292.]
- [37] Gray S T, Graumlich L J, Betancourt J L, et al. A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A. D. [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L12205.
- [38] Zhang R, Delworth T L, Held I M. Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L02709.
- [39] Grossmann I, Klotzbach P J. A review of North Atlantic modes of natural variability and their driving mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D24107.
- [40] Wang Jianglin, Yang Bao, Qin Chun, et al. Tree-ring inferred annual mean temperature variations on the southeastern Tibetan Plateau during the last millennium and their relationships with the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43: 627-640.
- [41] Knight J R, Folland C K, Scaife A A. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L17706.
- [42] Sutton R T, Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(11): 788-792.
- [43] Xu Meng, Xu Haiming, Ma Jing, et al. Impact of Atlantic multidecadal oscillation on interannual relationship between ENSO and East Asian early summer monsoon [J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(4): 2860-2877.
- [44] Wang Yanming, Li Shuanglin, Luo Dehai. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D02112.
- [45] Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 693-713.
- [46] Li S, Bates G T. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on the winter climate of East China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 126-135.
- [47] Kerr R A. A north Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*, 2000, 288(5473): 1984-1985.
- [48] Delaygue G, Bard E. An Antarctic view of Beryllium-10 and solar activity for the past millennium [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11/12): 2201-2218.
- [49] Anchukaitis K J, Wilson R, Briffa K R, et al. Last millennium Northern Hemisphere summer temperatures from tree rings: Part II, spatially resolved reconstructions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 163: 1-22.
- [50] Morgan J A, LeCain D R, Pendall E, et al. C₄ grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid

- grassland[J]. Nature, 2011, 476(7359): 202-205.
- [51] Miyake F, Nagaya K, Masuda K, et al. A signature of cosmic-ray increase in AD 774-775 from tree rings in Japan[J]. Nature, 2012, 486(7402): 240-242.
- [52] Mekhaldi F, Muscheler R, Adolphi F, et al. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4[J]. Nature communications, 2015, 6(1): 1-8.
- [53] Brehm N, Bayliss A, Christl M, et al. Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(1): 10-15.

Relationship between the tree ring width of *Sabina saltuaria* and climate factors in Haizi Mountain, Daocheng, Sichuan

ZOU Lili, XU Shanshan, ZHENG Chaogang, LI Shengrui, LIAN Wanjiang,
SHANG Zhiyuan, ZHANG Zhigang, KONG Xinggong, ZHAO Zhijun
(Key Laboratory for Virtual Geographic Environment, Ministry of Education; School of Geography,
Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Tree cores of *Sabina saltuaria* individuals in Haizi Mountain, Daocheng, Sichuan province were obtained and cross-dated. Consequently, standard ring width (STD) chronology in the upper tree line of *Sabina saltuaria* were established by using ARSTAN program. It was indicated that tree growths in this area were restricted by the temperature of early growing season. The correlation between mean temperature from last September to current February (MT_{p9-c2}) and the STD chronology was statistically significant ($R=0.56$, $P<0.01$), and the correlation was consistent with the biological characteristics of tree growth. Thereby, the 170-year (MT_{p9-c2}) variation in this area from 1850—2019 was reconstructed and the percentage of explained variance of transform function was 31.7%. The reconstruction was closely matched with the temperature variation recorded by neighboring tree ring records. The reconstruction sequence showed that the colder periods experienced in this area were 1870—1890 and 1960—1980 respectively; the warmer periods were 1884—1892, 1680—1700, 1919—1925, 1940—1960 and 1980—2019. The period of 1940—1960 was the warmest period in the 20th century and the temperature has been declined since 1960s. Afterwards, the temperature kept rising from 1980 and decreased mildly after 2010. The reconstructed temperature series was coinciding with the sunspot's number and the AMO index (Atlantic Multidecadal Oscillation), which revealed that some factors such as solar activity and sea surface temperature might exert an important influence on local temperature change.

Key words: tree ring; temperature reconstruction; tree line; *Sabina saltuaria*; Daocheng

(责任编辑：徐国保；编辑：周成林)