

DOI: 10.5846/stxb201506241285

张瑞波, 袁玉江, 喻树龙, 陈峰, 张同文, 尚华明, 范子昂. 树轮记录的青海过去 300 年 5—6 月平均最高气温时空变化. 生态学报, 2016, 36(23): 7603-7613.

Zhang R B, Yuan Y J, Yu S L, Chen F, Zhang T W, Shang H M, Fan Z A. The spatiotemporal variability of May—June maximum temperature in past 300 years on the Qinghai Plateau, according to tree ring records. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7603-7613.

树轮记录的青海过去 300 年 5—6 月平均最高气温时空变化

张瑞波*, 袁玉江, 喻树龙, 陈峰, 张同文, 尚华明, 范子昂

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆树轮生态重点实验室, 中国气象局树木年轮理化研究重点开放实验室, 乌鲁木齐 830002

摘要: 利用位于青海不同地理单元的新建立的 12 个树轮年表和青海 30 个气象站的气象资料, 采用 REOF 方法, 分析了青海地区气温场和树轮宽度场特征; 重建了青海过去 300 年 5—6 月平均最高气温。分析表明, 青海气温场和树轮宽度场第一特征向量相关系数为 -0.465 ($P < 0.01$), 两场的第一特征向量表现为同步变化, 气温场和树轮宽度场第一特征向量高值中心位于青海北部的祁连山区和柴达木盆地, 而低值中心位于青南高原西南部和东南部; 过去 300 年青海气温大致可分为 5 冷 5 暖的变化阶段, 存在 5 个明显的持续增温时段和 4 个持续降温时段, 增温缓慢, 降温迅速。最冷的时段为 1830s—1840s 年代, 最长的偏冷期为 19 世纪末 20 世纪初, 最暖的时段都发生在 1930s—1950s 年代, 最长的偏暖期为 18 世纪末 19 世纪初。20 世纪 60 年代以来, 青海 5—6 月平均最高气温持续上升, 尤其是 80 年代到现在, 青海地区平均最高气温呈现急剧持续上升; 过去 300 年青海地区 5—6 月平均最高气温具有 2.1、3.1、8.5、25.5a 和 68.0a 的变化准周期; 青海 5—6 月平均最高气温受西风和印度季风影响较大; 青海气候场重建序列的变化特征在一定程度上可代表青藏高原大部分地区甚至印度季风区 5—6 月平均最高气温。

关键词: 树木年轮; 青海; 气温场; 气候变化

The spatiotemporal variability of May—June maximum temperature in past 300 years on the Qinghai Plateau, according to tree ring records

ZHANG Ruibo*, YUAN Yujiang, YU Shulong, CHEN Feng, ZHANG Tongwen, SHANG Huaming, FAN Zi'ang
Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration; Key Laboratory of Tree-ring Ecology of Xinjiang Uigur Autonomous Region, Urumqi 830002, China

Abstract: In this study, tree ring samples of *Sabina przewalskii* were collected from 12 sites in the different geographical areas on the Qinghai Plateau. These were used to develop 12 tree ring width chronologies using standard dendrochronological methods. The characteristics of the temperature field and tree ring width field were analyzed, and the May—June maximum temperatures in past 300 years were reconstructed using 12 tree ring chronologies and meteorological data from 30 stations on the Qinghai Plateau. The analysis shows that the first eigenvector that is typical of the Qinghai temperature field and tree ring width has a field correlation coefficient of -0.465 ($P < 0.01$). The first characteristic change of the two fields is synchronization. The high value center of the first eigenvector is located at Qilian Mountains and Qaidam Basin on northern Qinghai, and the low center is located at southwest and southeast (Animating Mountains) on Qinghai Plateau. The May—June maximum temperature field in past 300 years had five warmer stages, five colder stages, and five continuous warming and four continuous cooling stages, with slow warming and rapid cooling. The coldest period was in the 1830s—1840s, the

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (IDM2016006); 国家自然科学基金 (41675152, 41405139)

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2016-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: river0511@163.com

longest colder period was from late 19th century to early 20th century, the warmest period was in the 1930s—1950s, and the longest warm period was from late 18th to early 19th century. Since the 1960s, the temperature of May—June has risen continuously on the Qinghai Plateau, and it has risen particularly sharply from the 1980s to the present. We detected significant changes ($P < 0.05$) in the May—June maximum temperature field in past 300 years, with 2.1, 3.1, 8.5, 25.5-yr and 68.0-year quasi-periodic changes. The May—June average maximum temperature was influenced by the southwest monsoon and westerly winds on the Qinghai Plateau. This work presents representative reconstructed temperatures for most of the Tibetan Plateau, even in the southwest monsoon region.

Key Words: tree-ring; Qinghai Plateau; temperature field; climate change

20 世纪 80 年代开始,全球变化科学引发了人类社会的广泛关注,气候变化、形成原因及其影响已经成为地球科学中最为活跃的研究领域,并取得重大进展。现代观测资料已经证实气候是不稳定的,在不同时间尺度上存在各种变率。对人类社会具有迫切现实意义的是几十年到百年尺度上的变化,关系到当代和今后几代人的生存环境^[1-2]。20 世纪气候变化的归因是当前全球关注的焦点之一,而解决这一问题的途径之一是对过去千年的气候变化历史进行精确重建^[3]。树木年轮由于具有空间分布广、时间序列长、分辨率高、定年准确、环境变化指示意义明确且可定量等优势而成为研究过去气候变化的首选代用资料之一,在揭示气候变化规律及机理研究中发挥了重要作用^[4-5]。近年来国际上著名的几条千年温度变化序列的建立都依靠了大量树轮资料^[6-9]。树木年轮气候重建研究在国外已经从单点小区域的气候要素重建发展到空间上大尺度的气候要素变化的重建。特别是对于欧洲和北美地区,由于树轮采样点较为密集,资料共享程度高,树轮资料丰富,近年来用树轮重建大空间尺度气候变化的研究较多^[10-14]。在亚洲,Ohyama 等利用 CRU 格点资料和 5 个树轮年表重建了东亚地区春季温度气候场^[15]。袁玉江等曾利用阿尔泰山和天山的多个树轮年表进行过较大地域范围的重建北疆 500a 干湿变化^[16]。

现代气候学研究表明,青藏高原是我国以及东亚气候变化的“敏感区”和“启动区”,其气候变率和突变对我国气候变化有着十分重要的先兆意义。青海省位于青藏高原之东北部,其气候变化具有明显的高原特色,同时是我国西北干旱区的干旱中心,是西部干旱区、东部季风区和青藏高原区三大区域的交汇地带,是全球变化的敏感区和生态系统脆弱区^[3];揭示青海省气候变化的规律,对研究青藏高原及周边地区生态环境的演变及制定气候变化影响的对策等方面具有现实意义。过去,对青海大量研究集中于利用祁连圆柏树轮重建过去千年气候序列^[17-30],科研人员已经在该地区建立了迄今为止中国最长的长达 3585a 的树轮年表^[31-33],重建了过去 2485 年温度状况并与历史朝代兴衰做了对比^[34-35],该曲线具有一定的全球代表性^[36]。但是大量的研究都是基于单点的树轮资料,很少有人利用整个青海不同气候区树轮多条序列重建气候场,了解过去整个青海地区气候的时空变化特征。利用树木年轮资料重建大范围的气候场是当今国际树木年轮气候研究的新动向和热点问题,也是我国树轮研究几近空白的薄弱环节。本研究利用青海地区不同地理单元的祁连圆柏树轮宽度年表重建该地区过去 300 年气候场,分析青海过去 300 年气候变化的时间序列特征及变化规律。

1 资料与方法

1.1 气象资料的选取

用于研究气候变化的资料不仅要有足够的序列长度,还应有足够的精确度,青海多数气象台站建立于 20 世纪 50 年代中后期,建站至 1960 年,不少台站存在较多的缺测、漏测和观测中断现象,根据均一性、代表性和比较性原则,本文选定青海省内 30 个站作为代表站(茶卡、达日、大柴旦、德令哈、都兰、刚察、格尔木、贵德、久治、冷湖、玛多、茫崖、门源、民和、囊谦、诺木洪、祁连、共和、清水河、曲麻莱、同仁、托勒、沱沱河、五道梁、西宁、小灶火、兴海、野牛沟、玉树、杂多),取各站 1961—2009 年的平均气温、平均最高气温、平均最低气温和降水量资料,并采用 Mann-Kendall 方法,来检查站址迁移是否引起观测资料的不连续(图 1)。

空间代表性分析气温资料来自英国 East Anglia 大学的 Climatic Research Unit(简称 CRU) 1901 年 1 月到 2009 年 12 月的高分辨率全球逐月格点数据集(CRU TS 3.1),其网格距均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。CRU 数据集有以下优点:在资料的重建过程中包含了严格的时间均一性检验,时间尺度更长,空间分辨率更高,该数据集被大量运用于气候变化研究中^[37]。

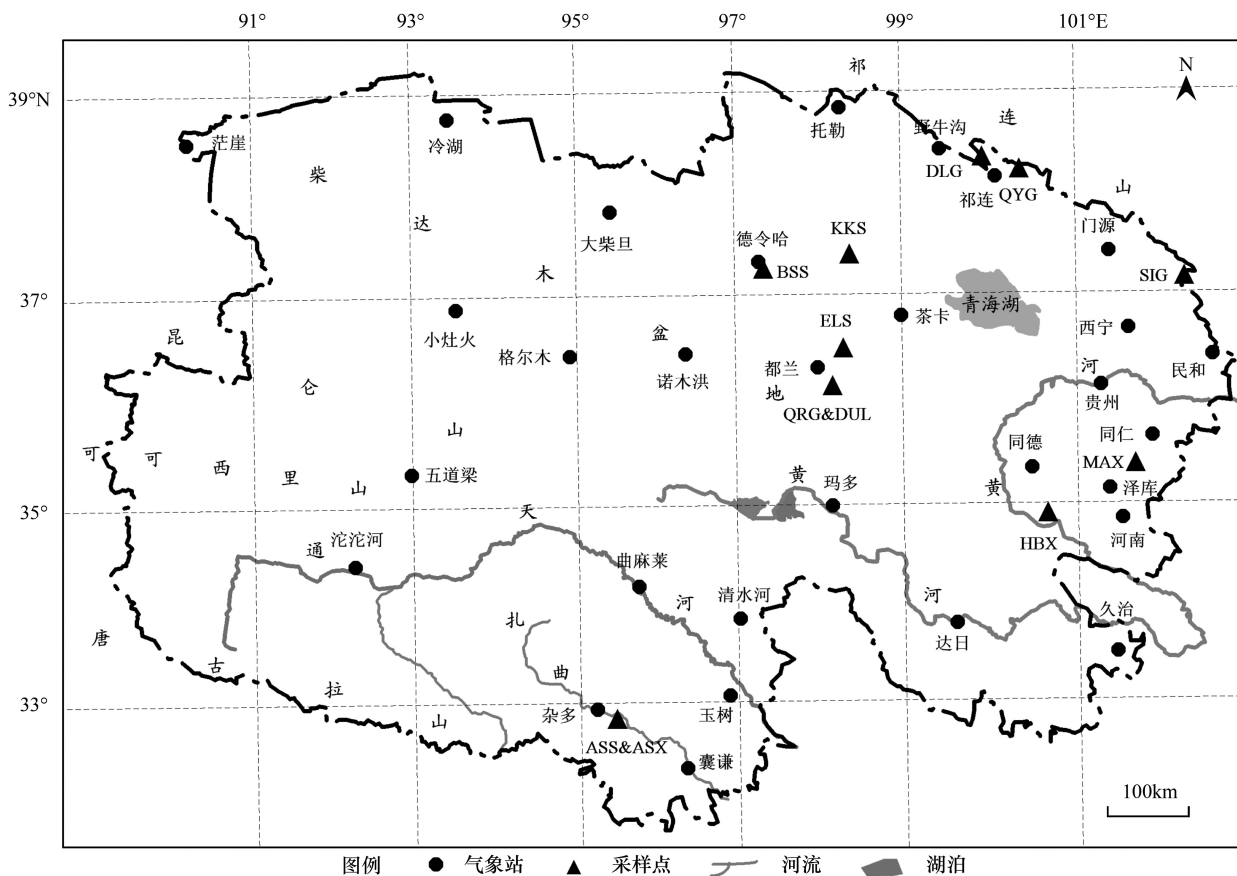


图 1 树轮采样点及气象站分布图

Fig.1 Location map of sampling sites and meteorological stations

1.2 树轮年表的建立

根据青海祁连圆柏的分布和区域代表性,研究组分别于 2007 年和 2009 年两次在青海柴达木盆地、祁连山、青南高原和青海东部共采集了 17 个采样点 676 棵树 1367 个祁连圆柏样芯(图 1,表 1),采样点海拔在 3000—4300 m 之间。将采集的树轮样本经过干燥、固定、打磨、交叉定年和轮宽测量;用 COFECHA 定年质量控制程序进行交叉定年的检验;采用 winARSTAN 年表研制程序完成树轮宽度年表的建立,在年表研制过程中,分别采用样条函数方法、负指数方法和区域曲线标准化方法进行去除生长趋势过程,比较发现,样条函数方法对拟合的序列对气候的响应较好,因此本研究最终采用样条函数拟合的年表进行气候分析,并剔除代表性较差或异常的序列,最终建立青海 12 个树轮宽度年表(图 2),其分布于青海不同重要地理单元,如柴达木盆地(QRG、DUL、BSS、ELS、KKS)、青南高原(ASS、ASX)、祁连山地区(DLG、QYG)、青海东部(HBX、MAX、SIG)。

1.3 研究方法

采用 DendroClim2002 相关分析和响应分析解释树轮径向生长对气候的响应;空间分析方法选取经验正交函数法(EOF)^[38],它能够把随时间变化的气象要素场分解为空间函数部分和时间函数(主分量)部分。空间函数部分概括场的地域分布特点,这部分是不随时间变化的;而时间函数部分则由空间点(变量)的线性组

合而构成,称为主分量,这些主分量的头几个占有原空间点(变量)的总方差的很大部分。本研究采用着重表现空间的相关性分布结构的旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)方法分析树轮场对气温场的代表性,采用了多元回归方法重建气候空间分布状况,采用区域平均序列的逐步回归方法重建气候时间序列;采用“逐一剔除法”^[39]进行交叉检验;利用功率谱分析方法对重建序列进行周期检验。

表 1 树轮采样点基本概况

Table 1 Environmental information of the tree-ring sampling sites							
采点名 Sampling Location	代号 Code	北纬(N) Latitude	东经(E) Longitude	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度 Slope	郁闭度 Canopy density
大柳沟	DLG	38°16′	100°00′	3350	S	30°	0.2
青羊沟	QYG	38°10′	100°26′	3200	E	20°	0.2
柏树山	BSS	37°09′	97°20′	3500		0°	0
鄂拉山	ELS	36°23′	98°20′	3560	NW	40°	0
曲日岗	QRB	36°01′	98°11′	3750	S	30°	0.15
柯柯寺	KKS	37°19′	98°24′	3390	S	5°	0
都兰	DUL	36°02′	98°13′	3724	SE	37°	0.13
寺沟	SIG	37°08′	102°28′	3023	SW	36°	0.43
麦秀	MAX	35°16′	101°53′	3214	SW	38°	0.62
河北乡	HBX	34°47′	100°49′	3418	NE	38°	0.57
昂赛上线	ASS	32°42′	95°37′	4249	S	35°	0.47
昂赛下线	ASX	32°43′	95°37′	4047	S	43°	0.64

2 结果与分析

2.1 青海气温场和树轮宽度场特征

将 12 个年表和 30 个气象站平均气温、平均最高气温、平均最低气温相关普查表明,整个青海地区,5—6 月平均最高气温与 12 个年表相关均较好,因此利用树轮重建的时段选取 5—6 月平均最高气温。

首先分析由 30 个气象站 1961—2008 年 5—6 月平均最高气温构成青海 5—6 月的平均最高气温场。REOF 空间分析表明(表 2,图 3),青海气温的同步性较好,反应其同步变化的第一特征向量占气温场方差总量的 62.06%,且均为正值。而第二特征向量仅占总方差的 15.33%,前 3 个特征向量对总方差的贡献率达到 81.62%且特征值均大于 1,其后各特征向量贡献率很小,所以青海地区 5—6 月平均最高气温具有较快的收敛速度,前三个特征向量可以较好的说明温度场的空间分布特征。经验正交第一模态(图 3)表明,整个青海地

表 2 气温场及树轮场特征值及主成分贡献率

Table 2 Eigenvector and accumulative total variance contribution of temperature field and tree-ring field				
主要特征参数 Main parameters	模态 Principal component	特征值 Eigenvector value	方差贡献率/% Variance contribution	累计贡献率/% Accumulative variance contribution
气温场 Temperature field	1	18.617	62.06	62.06
	2	4.599	15.33	77.39
	3	1.268	4.23	81.62
树轮场 Tree-ring field	1	4.737	39.47	39.47
	2	1.720	14.33	53.81
	3	1.372	11.43	65.24
	4	1.134	9.45	74.70

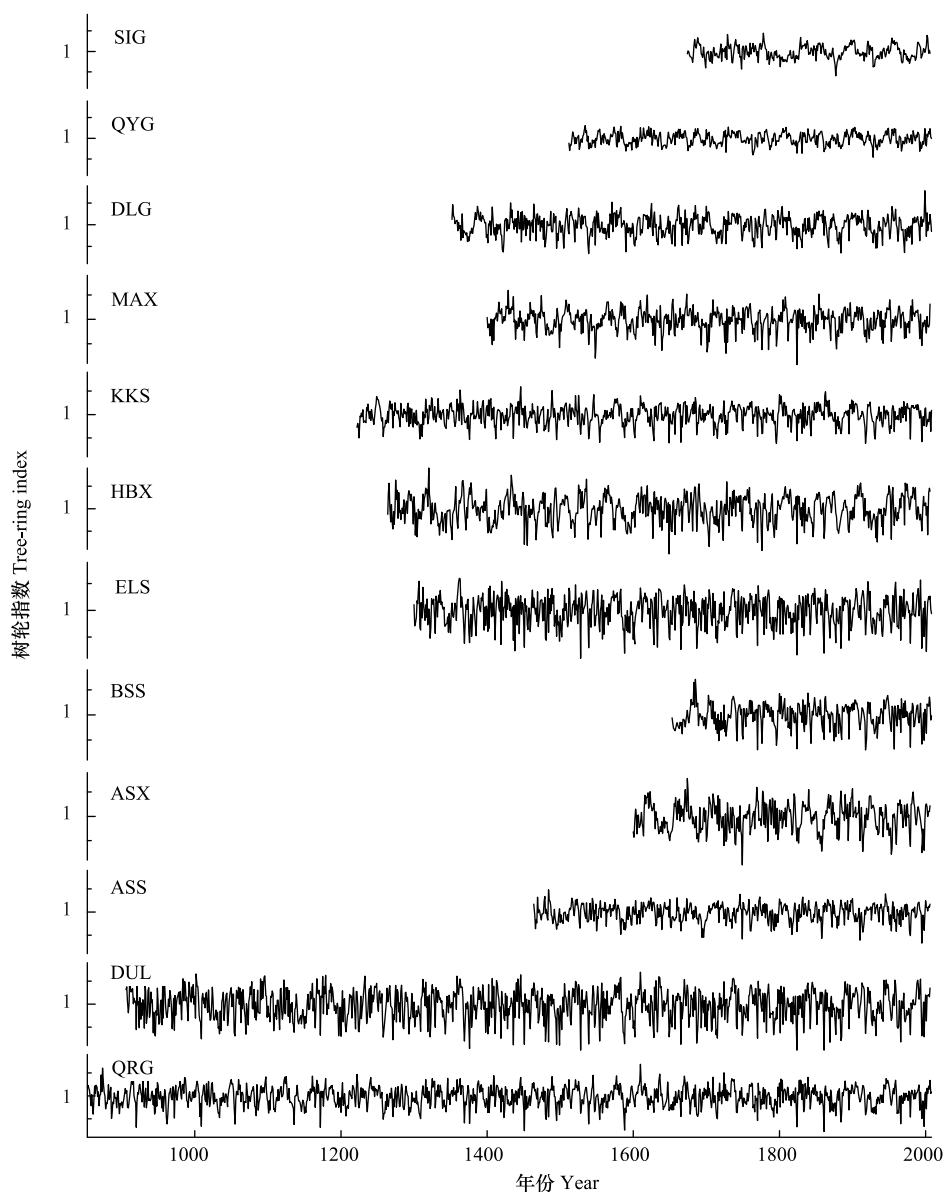


图 2 12 个树轮标准化年表指数

Fig.2 Tree-ring index chronologies

QRG、DUL、ASS、ASX、BSS、ELS、HBX、KKS、MAX、DLG、QYG、SIG 分别代表曲日岗、都兰、昂赛上线、昂赛下线、柏树山、鄂拉山、河北乡、柯柯寺、麦秀、大龙沟、青羊沟和寺沟采样点标准化年轮指数

区的主成分载荷都为正值,在 0.13—0.22 之间,相差很小,说明整个青海地区 5—6 月温度空间变化高度一致,虽然青海地区下垫面地形复杂,温差较大,但是各地变化趋势是非常一致的。高载荷量地区分布在青海北部,以祁连山和柴达木盆地为主。青南高原载荷量最低。

将 12 个年表 REOF 展开结果显示,第一特征向量均为正值,树轮宽度场中各采点变化趋势基本一致,但树轮宽度场收敛速度远小于气温场,第一特征向量对总方差的贡献率只有 39.47%,第二、第三、第四特征向量分别占总方差的 14.33%、11.43%和 9.45%,前 4 特征向量累计贡献率为 74.70%,这是因为树木年轮生长同时受到多个气候因子的影响,虽然平均最高气温是最大的影响因子,但其他气候因子仍然有较显著的影响,从而在树轮宽度场中表现为较慢的收敛速度^[40],按照特征值大于 1 作为截留主分量标准,本文用前 4 特征向量代表宽度场。

气温场和树轮宽度场第一特征向量相关系数为 -0.465 ($P < 0.01$),两场的第二特征向量均表现为同步变

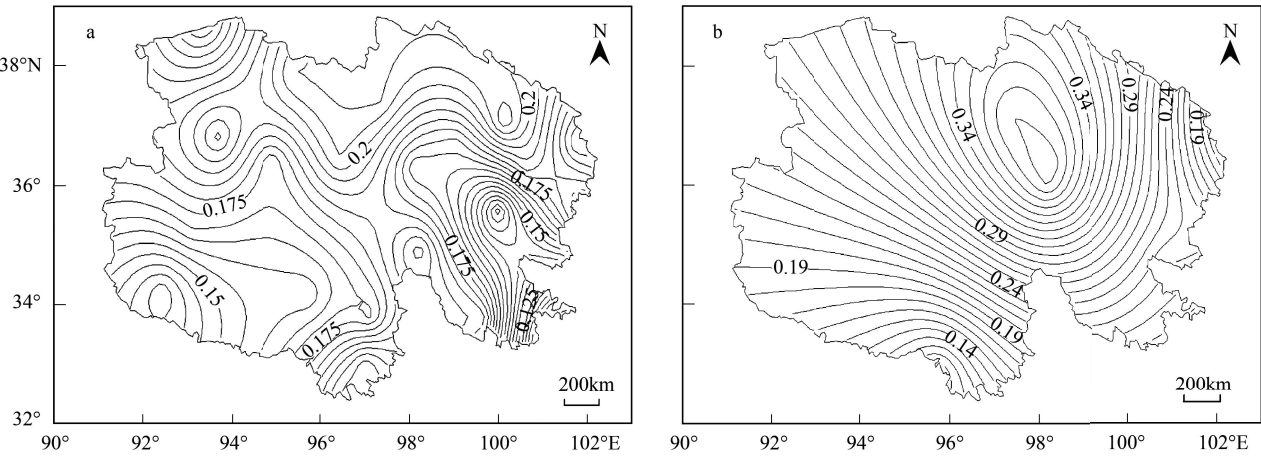


图3 青海气温场(a)和树轮宽度场(b)第一主成分分布型式

Fig.3 Distribution model of first eigenvectors of temperature field (a) and tree-ring field (b) in Qinghai

化一致的特点。气温场和树轮宽度场第一特征向量高值中心位于青海北部的祁连山区和柴达木盆地,而低值中心位于青南高原西南部和东南部(阿尼玛卿山)。

2.2 气温场的时间序列重建及检验

将 30 个气象站 5—6 月最高气温进行平均,得到青海的区域平均最高气温序列,利用逐步剔除回归法分别重建各气象站和区域平均最高温度序列,考虑到年表样本总体代表性(EPS),以子样本信号强度大于 0.85 的标准选取年表分析长度,最终共获得 1700—2006 年气温重建序列。其中 5 个年表进入青海地区平均最高气温序列的重建方程:

$$T_{56} = 1.35 \times \text{ASS} - 2.14 \times \text{ASX} + 1.08 \times \text{BSS} - 2.01 \times \text{ELS} + 1.52 \times \text{QYG} + 16.64$$

(1)

式中, T_{56} 为青海地区 5—6 月平均最高气温的区域平均序列(图 4),ASS、ASX、BSS、ELS、QYG 分别代表昂赛上线、昂赛下线、柏树山、额拉山、青羊沟树轮宽度年表。该方程复相关系数达到 0.764,重建值对实测值的方差解释量分别为 58.3%, $R^2_{\text{Adj}} = 0.531$, F 检验值 $F_{5,40} = 11.2$,超过 0.0001 的显著性水平。

重建效果较好的气象站分布在祁连山西部、柴达木盆地和青南高原地区,大部分复相关系数在 0.7 以上,较差的气象站分布在青海东部。这是因为青海东部海拔不高、并处于东南季风边缘区,受暖湿气流影响,因此该区域树木径向生长对气候的响应复杂,温度不是限制性因子。一般认为,高寒地区和森林上线树木径向生长对气温较为敏感,而青南高原和祁连山西部温度低,柴达木盆地虽然海拔较低,但是其 5—6 月平均最高气温低于青海东部,海拔较青海东部高。

表 3 重建方程的统计检验

Table 3 Leave-one-out, cross-validation statistics for May—June temperature reconstruction					
R	r	S_1	S_2	RE	t
0.684	0.611	17/45	12/46	0.463	4.748

R : 复相关系数, r : 逐一剔除后相关系数, S_1 : 一阶差符号检验, S_2 : 符号检验, RE : 误差缩减值, t 为乘积平均数

方程稳定性检验值如表,剔除相关和一阶差相关均超过 0.0001 的显著水平, S_1 未通过检验,而 S_2 通过 0.01 的显著性水平,说明相对于高频变化,重建序列在低频变化上同实测序列吻合得更好些。 t 值通过 0.001 的显著性水平, RE 值大于 0.3,可见重建方程是较为稳定的。区域平均序列重建值与近 45 年实测值一致性较好(图 5),说明重建的过去 300 年青海地区 5—6 月平均最高气温是较为可靠。

2.3 过去 300 年青海 5—6 月平均最高气温变化及代表性分析

为了解 1700—2006 年青海地区平均最高气温的冷暖阶段变化,将青海地区 5—6 月平均最高气温区域平

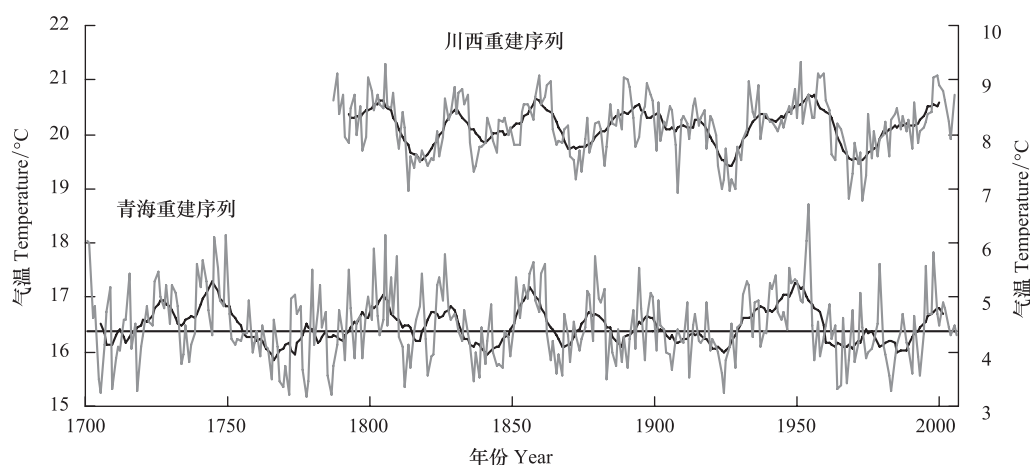


图 4 青海 5—6 月区域平均最高气温重建序列和川西 6—7 月平均最低气温气候场时间序列 (平均值为 1971—2000 年 30 年平均值)

Fig.4 Reconstruction series of May–June maximum temperature field and time series of June–July minimum temperature field on western Sichuan Plateau (Average value is 30 years from 1971 to 2000)

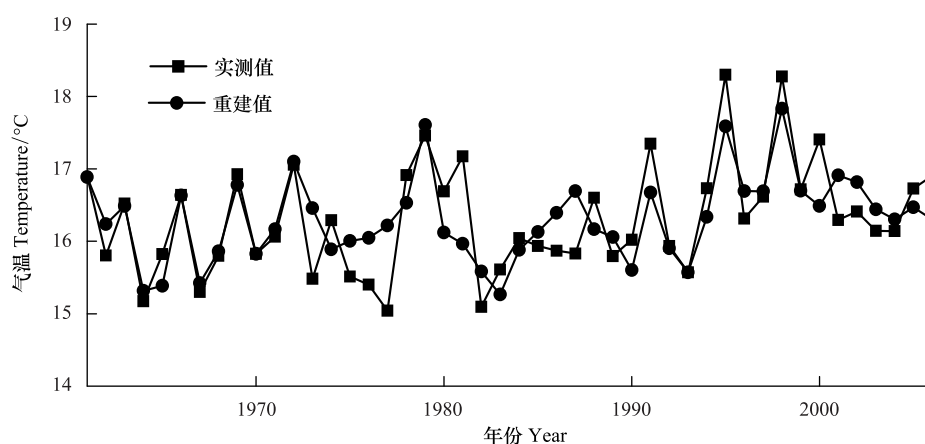


图 5 区域平均序列重建值与实测值对比

Fig.5 Comparison of actual and reconstructed temperature from 1961 to 2006

均重建序列进行 11a 滑动平均(图 4)。青海地区过去 300 年平均最高气温时间序列与喻树龙等利用川西 14 个树轮年表和 14 个气象站合成的川西高原过去 6—7 月平均最低气温场时间序列高度一致(图 4)^[40],表明整个青藏高原东北部过去 300 多年温度变化可能较为一致。过去 300 年青海气温大致可分为 5 冷 5 暖的变化阶段(表 4),最冷的时段为 19 世纪 30—40 年代,温度距平平均偏低 0.22℃,最长的偏冷期为 19 世纪末 20 世纪初的 40 多年,最暖的时段都发生在 20 世纪 30—50 年代,最长的偏暖期为 18 世纪末 19 世纪初的 40a。20 世纪 60 年代以来,青海 5—6 月平均最高气温持续上升,尤其是 80 年代到现在,青海地区平均最高气温呈现急剧持续上升现象。器测资料研究表明,柴达木盆地年平均气温在 1985 年前后发生了突变,1987—2010 年柴达木盆地各地的平均气温显著上升^[41]。施雅风等研究表明^[42],我国西北地区 1987—2000 年年均温比 1961—1986 年高 0.7℃。这些研究结果均与本文研究结果一致。20 世纪初和 60—80 年代为偏冷期,30—50 年代和 90 年代至今均为偏暖期与秦宁生等^[43]用树轮宽度重建的 6 月最高气温,Wu 等^[44]用最大密度年表重建的近百年 6—9 月平均气温的冷暖阶段完全一致。这些均不但表明本文重建结果具有一定的可靠性,而且说明,整个青藏高原东北部温度过去 300 年温度变化的一致性。

表 4 过去 300 年青海 5—6 月平均最高气温冷暖阶段分析

Table 4 The warm-cold periods of the reconstructed May—June maximum temperature in past 300 years

年份 Years	年数 Number of years	距平 Anomalies	年份 Years	年数 Number of years	距平 Anomalies
1706—1716	11	-0.11	1717—1754	38	+0.39
1755—1791	37	-0.16	1792—1831	40	+0.26
1832—1848	17	-0.22	1849—1884	36	+0.22
1885—1928	44	-0.08	1929—1959	31	+0.48
1960—1992	33	-0.19	1993—2001	9	+0.29

利用功率谱分析方法对青海 5—6 月平均最高气温时间序列进行周期分析,以了解过去 300 年青海地区 5—6 月平均最高气温时间演变的周期性,取最大滞后 $M=102$,相当于各序列长度的三分之一。分析发现(图 6),过去 300 年青海地区 5—6 月平均最高气温在 0.05 显著性水平上具有 2.1、3.1、8.5a 和 68.0a 的变化准周期。青海温度场重建序列具有 2.1a 和 8.5a 变化周期特征与“准两年脉动(QBO)”十分接近,已有研究表明,QBO 的影响存在于较大的范围,其可能与海气间相互耦合振荡有关^[45]。3.1a 准周期与厄尔尼诺(ENSO)的周期 3—5a 一致,ENSO 现象具有全球性,说明气温的变化可能与海气间相互耦合振荡有关,短周期振荡受大尺度海气相互作用的全球事件(ENSO)的影响^[46-47]。25.5a 对应太阳黑子活动 22a 准周期,说明太阳黑子的活动对这一区域的温度变化也有影响^[48]。68a 的变化准周期与全球气候系统海洋—大气的 50—88 年周期震荡一致^[49]。这些周期暗示了青海过去 300 年气温受当地气候变化影响外,还受到更大范围气候变化的影响,进一步证明了气候变化的全球性。

青海气候受多种因素的影响,其中大气环流是控制该地区气候特征的主要因素。相关分析表明,青海 5—6 月平均最高气温重建序列与 NAO、AO 及主要环流指数有较好的一致性(图 7),与 NAO($-0.198, P<0.05$)和 AO($-0.184, P<0.05$)呈显著负相关关系,与 5—6 月大西洋欧洲环流型 W 相关达到 -0.533 ,显著性水平超过 0.0001,还与 5—6 月北半球极涡强度指数、大西洋欧洲区极涡强度指数、北美区极涡强度指数、北半球极涡强度指数、北美大西洋副高北界、大西洋欧洲区极涡面积指数、青藏高原 A 相关通过了 0.01 显著性检验,这些环流指数都与西风环流有着密切关系,表明青海地区温度变化受西风影响显著。这是因为青海地区位于 31°

30° — $39^{\circ}19'N$,根据 500hPa 高空等压面分析,青海处在西风带之内,10 月至翌年 6 月,高原面对西风环流产生分支、绕爬流、屏障等动力作用,扩大了西风带的影响范围,因此西风环流成为影响和控制青海气候的重要因子之一。另外,青海重建序列还与 4 月份的南极涛动($-0.306, P<0.05$)、印缅槽指数($0.397, P<0.01$)以及南方涛动指数($-0.184, P<0.05$)呈负相关关系,表明该地区温度变化还受到印度季风的影响。青海地区温度和太平洋和亚洲的环流指数相关并不显著,说明太平洋气流及东亚季风对青海地区气候影响微弱。

空间相关分析表明(图 8),1901—2006 年 100 多年相关显示,重建区域平均序列和青海 CRU 相关大部分在 0.4 以上,而 1950—2006 年相关显示,重建区域平均序列和青海 CRU 相关大部分在 0.5 以上。说明青海 5—6 月区域平均最该气温重建序列可较好的代表整个青海地区 5—6 月平均最高气温。另外,无论是近 100 年还是近 50 年的空间相关均表明,青海区域平均序列与青藏高原大部分地区(包括川西高原)及南亚次大陆 5—6 月平均最高气温显著相关,青海气候场重建序列在一定程度上可代表西南季风区 5—6 月平均最高气温。

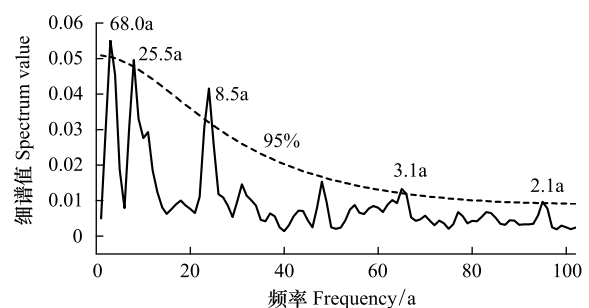


图 6 青海过去 300 年 5—6 月平均最高气温功率谱分析

Fig. 6 Power spectrum analysis of May—June maximum temperature on Qinghai Plateau in past 300 years

虚线为 $=0.05$ 的红噪音标准谱

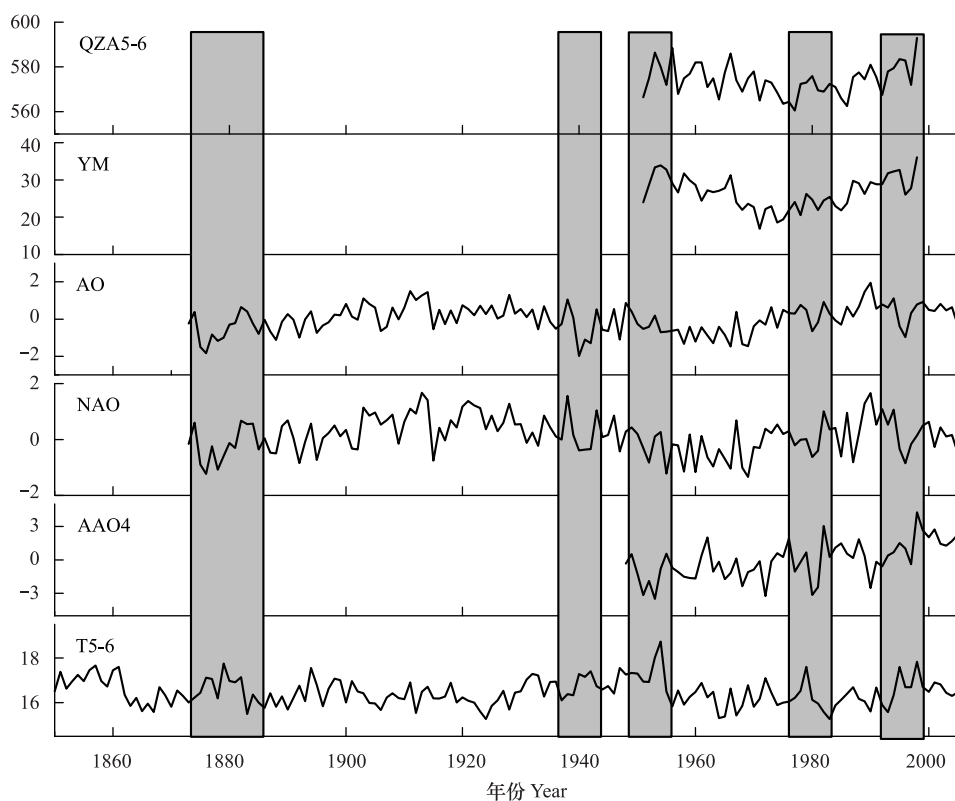


图7 青海 5—6 月平均最高气温与主要环流指数对比

Fig.7 Comparison between May—June maximum temperature on Qinghai Plateau and main circumscription index

QZA5-6: 青藏高原 A5—6 月指数;YM: 印缅槽指数;AO: 北极涛动指数;NAO: 北大西洋涛动指数;AAO4: 4 月份南极涛动指数

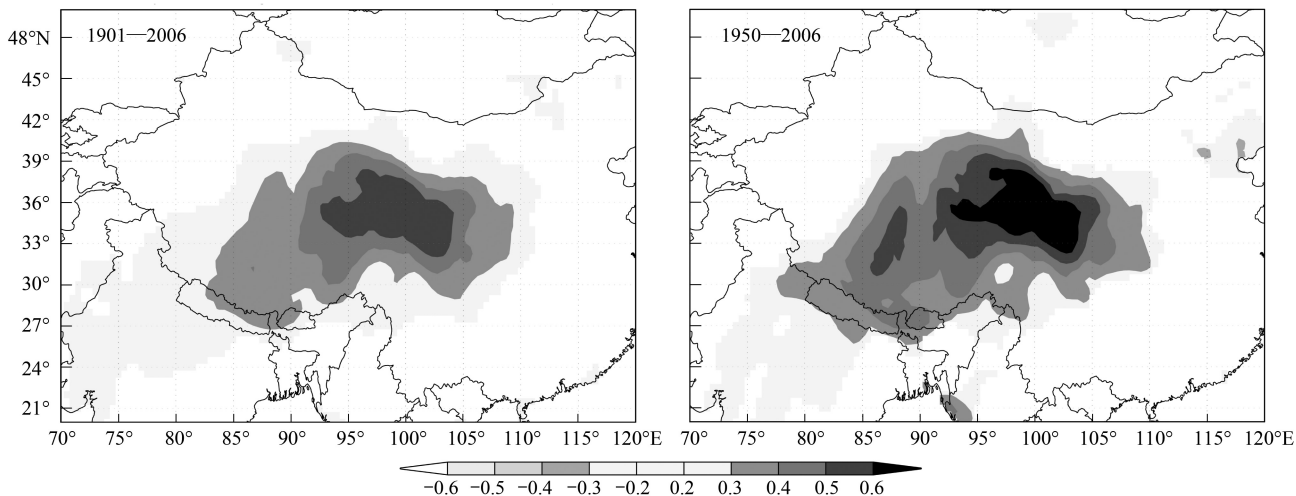


图8 青海 5—6 月区域平均最高气温重建序列与 CRU TS3.10 资料 1901—2006 年和 1950—2006 年 5—6 月平均最高气温相关

Fig.8 Spatial correlations between the temperature reconstruction and the gridded May—June temperatures of CRU TS 3.10

3 结论

(1) 气温场和树轮宽度场第一特征向量相关系数为 -0.465 ($P < 0.01$), 两场的特征向量均表现为同步变化一致的特点: 气温场和树轮宽度场第一特征向量高值中心位于青海北部的祁连山区和柴达木盆地, 而低值中心位于青南高原西南部和东南部(阿尼玛卿山)。

(2) 过去 300 年青海气温大致可分为 5 冷 5 暖的变化阶段, 最冷的时段为 1830s—1840s 年代, 最长的偏冷期为 19 世纪末 20 世纪初, 最暖的时段都发生在 1930s—1950s 年代, 最长的偏暖期为 18 世纪末 19 世纪初, 存在 5 个明显的持续增温时段和 4 个持续降温时段, 增温缓慢, 降温迅速。20 世纪 60 年代以来, 青海 5—6 月平均最高气温持续上升, 尤其是 80 年代到现在, 青海地区平均最高气温呈现急剧持续上升。过去 300 年青海地区 5—6 月平均最高气温具有 2.1、3.1、8.5、25.5a 和 68.0a 的变化准周期。

(3) 青海 5—6 月平均最高气温受西风影响和印度季风显著, 太平洋及东亚季风对青海地区气候影响微弱; 青海气候场重建序列在一定程度上可代表青藏高原大部分地区甚至西南季风区 5—6 月平均最高气温。

致谢: 本研究使用的青海祁连圆柏树轮年表均是在中国科学院地理科学与资源研究所邵雪梅研究员和中国科学院青藏高原研究所朱海峰副研究员的指导下完成, 中国科学院地理科学与资源研究所王丽丽研究员参加了野外采样工作, 特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 叶笃正, 符淙斌. 全球变化的主要科学问题. 大气科学, 1994, 18(4): 498-512.
- [2] 秦大河. 中国西部环境演变评估(综合卷): 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社, 2002: 8-9.
- [3] 杨保, 史锋, Sonechkin D M, 王章勇, 秦春. 过去千年气候变化重建研究新进展. 中国沙漠, 2011, 31(2): 485-491.
- [4] Graumlich L J. A 1000-year record of temperature and precipitation in the Sierra Nevada. Quaternary Research, 1993, 39(2): 249-255.
- [5] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. Nature, 1998, 392(6678): 779-787.
- [6] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 295(5563): 2250-2253.
- [7] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. Geography Research Letter, 1999, 26(6): 759-762.
- [8] Mann M E. Climate over the past two millennia. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35(1): 111-136.
- [9] Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan J O, Herzig F, Heussner K U, Wanner H, Luterbacher J, Esper J. 2500 Years of European climate variability and human susceptibility. Science, 2011, 331(6017): 578-582.
- [10] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review. Global and Planetary Change, 2004, 40(1/2): 11-26.
- [11] Cook E R, Esper J, D'Arrigo R D. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(20/22): 2063-2074.
- [12] Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, Tett S F B. 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.
- [13] Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, Bradley R S, Hughes M K, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni F. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly. Science, 2009, 326(5957): 1256-1260.
- [14] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. Science, 2010, 328(5977): 486-489.
- [15] Ohyama M, Yonenobu H, Choi J N, Park W K, Hanzawa M, Suzuki M. Climate field reconstruction of East Asian spring temperature. Climate of the Past Discussions, 2012, 8(4): 3535-3549.
- [16] 袁玉江, 韩淑妮. 北疆 500 年干湿变化特征. 冰川冻土, 1991, 13(4): 315-322.
- [17] 杨保. 树轮记录的小冰期以来青藏高原气候变化的时空特征. 第四纪研究, 2012, 32(1): 81-94.
- [18] 朱海峰, 郑永宏, 邵雪梅, 刘晓宏, 徐岩, 梁尔源. 树木年轮记录的青海乌兰地区近千年温度变化. 科学通报, 2008, 53(15): 1835-1841.
- [19] Liu Y, An Z S, Ma H Z, Cai Q F, Liu Z Y, Kutzbach J K, Shi J F, Song H M, Sun J Y, Yi L, Li Q, Yang Y K, Wang L. Precipitation variation in the northeastern Tibetan Plateau recorded by the tree rings since 850 AD and its relevance to the Northern Hemisphere temperature. Science in China: Series D Earth Sciences, 2006, 49(4): 408-420.
- [20] Bräuning A. Dendrochronology for the last 1400 years in eastern Tibet. GeoJournal, 1994, 34(1): 75-95.
- [21] Bräuning A. Climate history of the Tibetan Plateau during the last 1000 years derived from a network of Juniper chronologies. Dendrochronologia,

- 2001, 19(1): 127-137.
- [22] Shao X M, Huang L, Liu H B, Liang E Y, Fang X Q, Wang L L. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(7): 939-949.
- [23] Yang B, Bräuning A, Johnson K R, Shi Y F. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 38-1-38-4, doi: 10.1029/2001GL014485.
- [24] Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, Kang X C, Huang J G. A 326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739.
- [25] Zhang Q B, Qiu H Y. A millennium-long tree-ring chronology of *Sabina przewalskii* on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2007, 24(2/3): 91-95.
- [26] Zhang Y, Gou X H, Chen F H, Tian Q H, Yang M L, Peng J F, Fang K Y. A 1232 years tree-ring record of climate variability in the Qilian Mountains, Northwestern China. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 407-420.
- [27] 康兴成, Graumlich L J, Sheoood P. 青海都兰地区 1835 年来的气候变化——来自树轮资料. 第四纪研究, 1997, (1): 70-75.
- [28] Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, Heussner H U, Wagner M, Österle H, Thompson L G. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China. *Climate Dynamics*, 2004, 23(7/8): 869-881.
- [29] Yang B, Qin C, Wang J L, He M H, Melvin T M, Osborn T J, Briffa K R. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *PNAS* 2014.111(8):2903-2908.
- [30] Liu X H, Qin D H, Shao X M, Chen T, Ren J W. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(4): 521-529.
- [31] 邵雪梅, 王树芝, 徐岩, 朱海峰, 许新国, 肖永民. 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.
- [32] Shao X M, Wang S Z, Zhu H F, Xu Y, Liang E Y, Yin Z Y, Xu X G, Xiao Y M. A 3585-year master ring-width dating chronology of Qilian Juniper from the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 379-394.
- [33] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, Liang E, Zhu H, Wang S. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17/18): 2111-2122.
- [34] 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.
- [35] Liu Y, Cai Q F, Song H M, An Z S, Linderholm H W. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(28-29): 2986-2994.
- [36] 刘禹, 蔡秋芳, 宋慧明. 关于青藏高原 2485 年温度的季节和空间代表性问题. 第四纪研究, 2013, 33(1): 108-114.
- [37] Xu H M, Taylor R G, Kingston D G, Jiang T, Thompson J R, Todd M C. Hydrological modeling of river Xiangxi using SWAT2005: a comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 54-59.
- [38] Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006: 1857.
- [39] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 171-172.
- [40] 喻树龙, 袁玉江, 魏文寿, 尚华明, 张同文, 陈峰, 张瑞波. 川西高原 6—7 月最低气温场重建研究. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1010-1016.
- [41] 戴升, 申红艳, 李林, 王振宇, 肖建设. 柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析. 高原气象, 2013, 32(1): 211-220.
- [42] Shi Y F, Shen Y P, Kang E, Li D L, Ding Y J, Zhang G W, Hu R J. Recent and future climate change in northwest China. *Climate Change*, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [43] 秦宇生, 时兴合, 邵雪梅, 汪青春. 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.
- [44] Wu P, Wang L L, Shao X M. 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(2): 201-210.
- [45] 钱维宏, 朱亚芬, 叶谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率. 科学通报, 1998, 43(10): 1098-1102.
- [46] Rittenour T M, Brigham-Grette J, Mann M E. El Niño-like climate teleconnections in new England during the late Pleistocene. *Science*, 2000, 288(5468): 1039-1042.
- [47] Huber M, Caballero R. Eocene El Niño: evidence for robust tropical dynamics in the “Hothouse”. *Science*, 2003, 299(5608): 877-881.
- [48] Rasmusson E M, Wang X L, Ropelewski C F. The biennial component of ENSO variability. *Journal of Marine Systems*, 1990, 1(1/2): 71-96.
- [49] Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years. *Nature*, 1994, 367(6465): 723-726.