

青海杂多大果圆柏年轮指示的公元 1360~2005 年 5~6 月最高气温变化

时兴合^{①②}, 秦宁生^{①*}, 朱海峰^③, 邵雪梅^③, 汪青春^②, 朱西德^②

① 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072;

② 青海省气候中心, 西宁 810001;

③ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: qinns0515@163.com

2009-11-30 收稿, 2010-03-17 接受

国家自然科学基金重大项目(40599424)、四川省气象局重点科研项目(重 08-02)和中国气象局成都高原气象研究所科研专项(BROP200810)资助

摘要 根据采自青海南部高原杂多地区的树木年轮样本, 建立了该地公元 1360~2005 年标准树轮宽度年表。通过相关函数、响应函数和偏相关分析发现, 该年表对杂多气象站点 5~6 月的平均最高气温响应敏感, 呈显著负相关关系。因此利用该年表重建了杂多地区 1360 年以来春末夏初的平均最高气温序列, 并应用交叉检验方法对 1961~2005 年重建的校准方程进行了检验。该重建校准方程的方差解释量达 59.8%。由于高温会使树木蒸腾作用加强, 从而造成水分胁迫, 所以在重建序列中, 高温的可靠性和准确性比低温的要高。通过对重建序列的进一步分析得出, 1360 年以来在年代际的时间尺度上, 气温显著偏高且持续时间较长的时段有 6 个, 即 1438~1455, 1572~1612, 1684~1700, 1730~1754, 1812~1829 和 1853~1886 年; 气温显著偏低且持续时间较长的时期有 5 个, 即 1547~1571, 1701~1729, 1755~1777, 1830~1852 和 1887~1910 年。通过与邻近地区反映平均最高气温的标准树轮宽度年表以及利用树轮重建的平均最高气温的序列的对比, 发现一些年代际尺度的变化在区域上比较一致。

关键词

树轮
重建
平均最高气温
青海杂多

研究^[1,2]表明, 在几十年时间尺度上青藏高原往往表现为东亚地区气候变化的启动区。然而, 青藏高原上气象站稀少, 建站时间又较晚, 这些因素限制了高原上气候变化规律的研究。因此借助代用资料恢复历史上气候要素的变化, 以及利用树木年轮宽度变化研究对气候的响应, 同时获取某些气候要素的代用资料, 对青藏高原历史时期气候变化的研究具有十分重要的意义, 并受到高度重视^[3~5]。

许多研究利用冰芯、湖芯等资料重建了高原上若干地点过去 2000 年以来的气候变化规律和特征^[6~10]。树木年轮资料具有定年准确、连续性强和分辨率高等特点, 长期以来在青藏高原环境变化研究中得到高

度重视, 特别是近 10 年来, 在青藏高原上利用树轮宽度资料进行气候变化重建的研究取得了长足的进展^[11~20], 这些研究弥补了由于高原气象站稀少、观测资料较短, 故用器测资料研究高原气候变化及成因受到限制的缺陷, 可使人们更好地了解高原历史气候变化全貌。然而, 正如 Jones 等人^[21]强调的那样, 对于获取过去千年准确的气候变化史实, 还需要更多的气候变化代用资料。为进一步丰富青藏高原历史气候变化的代用资料, 本文开展了这方面的研究工作。

本文利用青海省杂多县的树轮宽度样本资料, 建立了树木年轮宽度的标准年表, 在分析树轮宽度指数与气候要素的关系的基础上, 重建了研究区 5~6

英文版见: Shi X H, Qin N S, Zhu H F, et al. May—June mean maximum temperature change during 1360—2005 as reconstructed by tree of *Sabina tibetica* in Zaduo, Qinghai Province. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3237-x

月的平均最高气温序列,并对重建序列的变化进行了分析.其目的是为青藏高原历史气候变化规律研究提供基础资料,并为当地政府决策部门制定应对气候变化影响的措施提供科学支持.

1 资料与方法

本文所用树轮样本采自澜沧江上游杂多县囊赛乡境内原始森林,采样区树木生长的海拔高度在4100~4500 m之间,树种以散生的原始大果圆柏(*Sabina tibetica* Kom.)为主^[22],是青海省分布最高的森林群落,土壤类型是疏林草甸土,处在年轻的发育阶段,土壤层薄,坡度大,树木立地条件较差,生长缓慢,郁闭度较小(0.14),受人类活动影响较少.采样地点(图1)位于32°39'36"N, 95°43'14"E,海拔高度为4200~4230 m,采样树木为树龄较长的健康活树,共采了29棵树的67个树芯.

按照树木年轮分析的基本程序,依次对样芯进行了干燥(自然晾干)、固定、打磨、定年以及树轮宽度量测^[23,24];首先以0.01 mm精度的树木年轮宽度量测仪进行年轮宽度测量,之后对年轮宽度数据用COFECHA程序^[25,26]进行了交叉定年的检验,以检查定年和年轮宽度量测的主观错误,判断各样本序列同主序列之间的相关,剔除奇异点过多或与主序列之间相关较差的个别样本.经过对采样点67个样本的反复检查,最终筛选出23棵树的46个样本序列(每棵树2个样芯).然后,用ARSTAN程序建立树木年轮宽度指数年表^[27].经过反复比较,我们发现用100 a步长的样条函数拟合生长趋势及非气候因素造

成的变化能够最好地使树轮宽度指数序列中保留较多的公共变化,因此在年表建立过程中用100 a步长的样条函数对每个样本的树轮宽度序列进行了树木生长趋势拟合,去除了树木由年龄造成的生长趋势和树木间相互竞争导致的低频变化,最后经过双权重平均法得到3种年表,即标准化(STD, 1290~2005年)、差值(RES)及自回归(ARS)年表.为了定量评价STD序列,对去除趋势后的指数序列进行了公共区间分析,选择的公共区间为1601~1900年,计算了序列间相关系数、平均敏感度^[24]、总体代表性^[28]等统计量.

气候资料来自距离采样点最近的杂多气象站(32°54'N, 95°18'E, 4066.4 m),所用时段为1961~2005年,气候要素包括月平均气温、月平均最高和最低气温、月降水量等.为了检查该站资料是否存在由于迁站等原因造成的非均一性问题,对该站的建站历史进行了核查,发现该站自建站以来没有进行过站点的迁移,从建站开始就严格按照气象观测规范进行观测,所采用的观测仪器全部由国家气象局配发并经过严格的质量检测.观测数据经过了青海省气候中心专门从事报表质量审核的专家审核.我们也将该站的资料和网格点气候资料^[29]在32.75°N, 95.25°E和32.75°N, 95.75°E点的数据进行了检验,通过Mann-Kendall^[30]和Double Mass检验^[31],发现杂多站气候资料相对均一,能代表气候要素的自然变化.

为了分析树轮的径向生长与气候要素的关系,采用了树轮气候学中常用的响应函数和相关函数^[24].相关函数即计算气候要素的月值与树轮宽度年表的

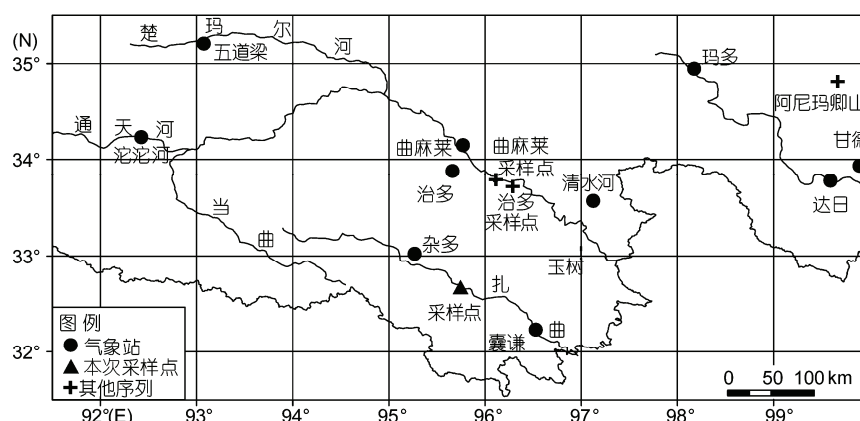


图1 树木年轮采样点、气象站具体位置图

相关系数, 同样可为选择要重建的气候要素提供依据. 响应函数是将气候资料与树轮宽度指数进行回归, 使之与气候要素的变量相对应, 回归系数的绝对值越大, 说明该月份的气候状况对树木生长影响越大. 因此, 根据响应函数的计算值可以分析气候要素对树木径向生长的影响, 并可定量地评价影响的程度. 为了得到对回归系数显著性检验的准确结果, 采用了 500 次采取子样本的 bootstrap 方法^[32]. 在计算响应函数和相关函数时, 选取了 12 个月的气候要素, 即上一年 10 月~当年 9 月. 为了评价选定的气候要素对树木生长的确切影响, 采用了偏相关分析. 通过控制气候要素间相互相关的影响, 更加严格、准确地评价所选气候要素对树木生长的影响. 响应函数、相关分析以及偏相关分析所用的时段为 1961~2005 年.

在分析树木生长-气候要素关系的基础上, 选取了具体的气候要素和重建季节. 考虑到气候对树木的生长会通过植物本身造成滞后影响^[24], 将当年以及落后一年的树轮宽度指数作为候选自变量与选取的气候要素进行回归. 重建方法采用的是逐步回归分析, 并以自变量所对应回归系数的显著水平 $\alpha=0.05$ 作为保留条件确定最后方程. 为了检验重建方程的稳定性, 利用交叉验证法^[33]对方程进行了验证. 验证的参数包括原始值符号检验、一阶差符号检验、乘积平均 t 值、误差缩减值以及相关系数. 此外, 还对重建序列进行了变化趋势分析, 以揭示过去几百年气候变化的事实.

2 结果与讨论

2.1 树轮年表及其对气候因子的响应

为了尽可能地保持树轮年表中低频变化的信息, 本文选择了标准树轮年表(STD). 表 1 是标准树轮宽度年表的基本概况和公共区间分析结果. 可以看出, 该年表的敏感性较好, 序列标准差和缺少的树轮百分比比较小, 第 1 主成分方差解释量较大, 序列间和树内树间有较高的相关性, 总体代表性较高, 这些统计量反映出所建立的树轮宽度年表具有较多的公共性变化, 且变化能够代表采样点群体的变化. 根据序列

的子样本信号强度^[28], 并选择 0.85 为标准, 发现 1360 年以来的树轮宽度年表变化较为可靠.

相关分析结果得出, 采样点标准树轮宽度年表(STD, 下同)与 5, 6 月的平均气温、平均最高气温、蒸发量、相对湿度、日照时数以及 5 月降水量、10 月及 12 月平均最低气温、12 月平均气温及日照时数均有显著的相关关系(表 2). 但与 5, 6 月的平均最高气温相关最高. 如果将 5 月和 6 月的最高气温平均再与树轮宽度年表做相关, 其相关系数高达 -0.77 ($\alpha<0.001$). 响应函数结果表明, 平均最低气温、平均最高气温、平均气温分别和降水量组合的变化可以分别解释 64%, 70%和 73%的标准树轮宽度年表的方差. 与相关分析结果相同, 响应函数揭示在所有的气温和降水量要素中, 5, 6 月的平均最高气温对树木径向生长的负影响最为显著(图 2). 为了去除 5, 6 月最高气温和降水量之间相互作用对树木生长-气候要素关系的影响, 进行了偏相关分析. 偏相关分析结果发现, 将 5, 6 月平均最高气温的影响取固定时, 标准树轮宽度年表与 5 月降水量的偏相关系数只有 0.06; 而反过来固定 5 月降水量的影响时, 标准树轮宽度年表与 5, 6 月平均最高气温的偏相关分别达 -0.64 ($\alpha<0.001$)和 -0.55 ($\alpha<0.001$), 而与 5~6 月平均最高气温的偏相关更达 -0.72 ($\alpha<0.001$). 进一步说明, 5, 6 月平均最高气温对树木径向生长的负影响极为显著. 如果不考虑 5 月降水的影响, 5~6 月平均最高气温与树轮宽度年表的相关达 -0.77 ($\alpha<0.001$).

上述结果表明, 春末夏初的高温抑制了取样点树木的径向生长. 一般来说, 限制树木生长最直接的要害是树内的水分^[24]. 该水分由两部分控制, 一部分是从土壤水分中吸收(输入), 另一部分是从植物体蒸发, 也就是蒸腾作用(输出). 降水量通过补给土壤水分和植物体水分输入有直接的关系, 最高气温和植物体水分输出有直接的关系. 此外, 最高气温还会使土壤水分蒸发, 减少土壤的含水量. 研究区虽然地处半湿润区, 但杂多县气象站(海拔 4066.4 m, 比取样点低约 150 m)资料显示, 该地区降水主要集中在 6~9 月. 5 月份的降水量仅为 46.2 mm, 所以 5 月份的降水量与轮宽为正相关关系, 到 6 月份, 降水量猛增

表 1 标准树轮宽度年表概况和公共区间分析(1601~1900 年)的基本特征

代号	起始年	序列 标准差	序列 敏感度	缺轮 百分比	1 阶自相关 系数	序列间 相关系数	树间 相关系数	树内 相关系数	总体 代表性	第 1 主成分 方差解释量
ZD	1290	0.28	0.27	0.94	0.41	0.54	0.53	0.82	0.97	56.00

表2 各月气候要素与采样点标准树轮宽度年表之间的相关统计表^{a)}

	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
降水量	-0.07	-0.10	-0.28	0.24	0.05	0.16	0.06	0.42 [*]	0.01	-0.11	0.04	-0.03
平均气温	0.18	0.20	0.32 [#]	0.13	0.03	-0.16	-0.06	-0.66 ^{**}	-0.42 [*]	0.22	0.16	0.20
平均最高气温	0.06	0.18	0.21	0.09	0.03	-0.12	-0.12	-0.71 ^{**}	-0.56 ^{**}	0.20	0.15	0.20
平均最低气温	0.32 [#]	0.15	0.30 [#]	0.12	-0.03	-0.16	0.07	-0.20	-0.13	0.18	0.10	0.07
相对湿度	0.16	-0.16	-0.10	0.01	0.05	0.15	0.12	0.41 [*]	0.41 [*]	0.05	-0.09	-0.09
蒸发量 ^{b)}	0.0	0.08	-0.02	0.04	0.04	-0.20	-0.04	-0.49 ^{**}	-0.49 ^{**}	-0.03	0.04	0.10
日照时数	-0.05	-0.11	-0.34 [#]	-0.19	-0.20	0.18	-0.09	-0.41 [*]	-0.33 [#]	0.03	-0.03	0.05

a) 表中标有[#], ^{*}, ^{**}的数据分别表示通过了 $\alpha=0.05$, $\alpha=0.01$, $\alpha=0.001$ 的显著水平; b) 蒸发量资料是1961~2003年

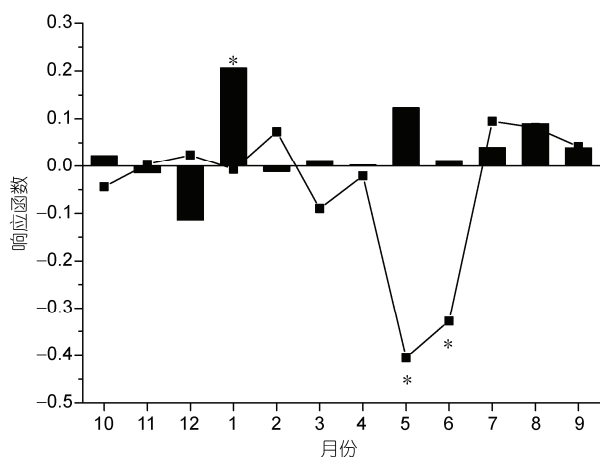


图2 杂多标准树轮宽度年表与月平均最高气温(实线)和月降水量(柱形)的响应函数结果
*表示通过了 $\alpha=0.05$ 的显著水平

至117.4 mm, 比5月份多了1.5倍以上, 降水与轮宽就没有了相关关系. 5月的平均最高气温已高达12.6℃. 由于5月较少的降水量以及较高的最高气温, 土壤水分蒸发和植物蒸腾作用加强, 从而限制树木生长, 而与土壤水分蒸发和植物蒸腾有直接关系的最高气温就成了限制因子. 6月份最高气温进一步增加, 蒸腾作用仍有加强, 但水分的补给比较充分, 所以, 轮宽与6月最高气温的关系比5月有所减弱. 这种5, 6月平均最高气温对标准树轮宽度年表的影响高于同期降水影响的结果, 与秦宁生等人^[16]在邻近的治多和曲麻莱、勾晓华等人^[19]在阿尼玛卿山的结果一致. 蔡秋芳等人^[34]在陕西中北部也发现树木径向生长和生长季温度的显著负相关关系大于与同期降水量的相关关系. 可见研究区和陕西中北部的样点对气温和降水的响应也有较好的一致性. 鉴于最高气温与树轮

的相关远强于降水量和其他一些气候指标, 我们选择了春末夏初的最高气温作为重建的对象.

2.2 5~6月平均最高气温的重建

根据上述相关、响应函数与偏相关分析结果, 选用杂多(ZD)标准树轮宽度年表重建该地5~6月平均最高气温序列, 校准时段为1961~2005年. 逐步回归的结果显示, 落后一年的标准树轮宽度年表没有达到 $\alpha=0.05$ 显著水平, 因此重建的回归方程为

$$K_i = -3.46ZD_i + 13.33,$$

式中 K_i 为第 i 年的5~6月平均最高气温, ZD_i 为第 i 年杂多标准树轮宽度年表值. 该方程解释的方差量为59.8%, 调整后的方差解释量为58.9%, 误差的标准差为0.74, F 检验值为64.08, 通过了 $\alpha=0.0001$ 的显著水平. 交叉验证中符号检验结果显示原始值符号一致的年份有30 a, 一阶差符号一致的年份也为30 a, 分别达到了 $\alpha=0.02$, $\alpha=0.05$ 的显著水平. 乘积平均 t 值为2.18, 误差缩减值为0.56, 相关系数为0.75 ($\alpha<0.001$). 由于误差缩减值 >0 , 说明重建方程可靠. 从重建时段杂多5~6月平均最高气温重建值与实测值的对比曲线(图3)可以看出, 两者之间具有很好的相似性. 从交叉验证法统计量检验结果和重建及实测的对比结果看, 该重建方程较为可靠. 利用该重建方程, 重建了杂多过去646年(1360~2005年)5~6月平均最高气温的年际变化曲线(图4).

仔细观察图3可以看出, 在温度高的年份, 如1979, 1995和1998年, 观测值和重建方程的预报值之间比较接近, 而在低温的年份, 如1977, 2001和2003年, 两者之间差距较大, 特别是对过去几十年里发生在1977年的最低温度的预报效果很差. 这主

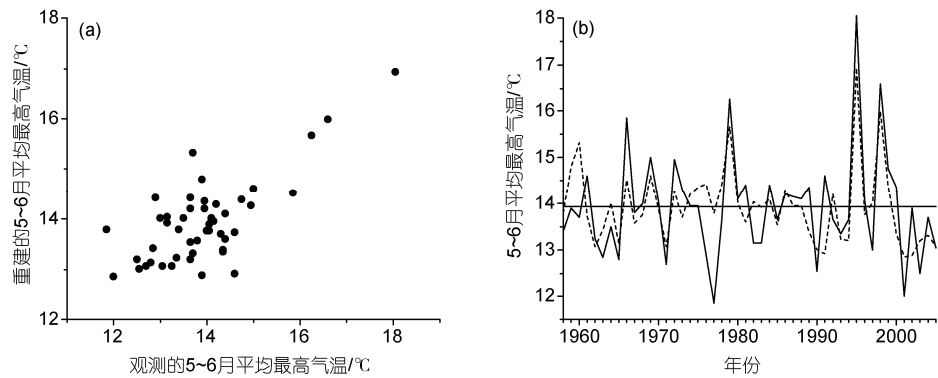


图 3 1961~2005 年杂多 5~6 月平均最高气温的重建值与实测值的散点图(a)及变化曲线(b)
虚线, 重建值; 实线, 实测值

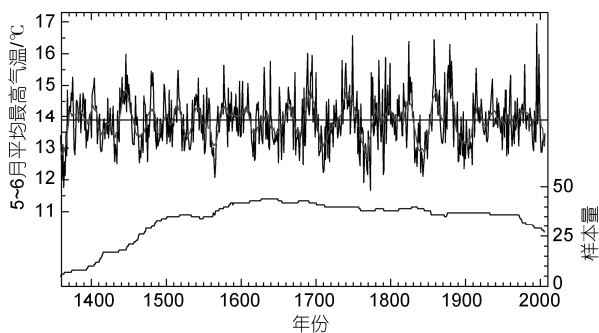


图 4 重建的 1360~2005 年青海杂多 5~6 月平均最高气温的逐年变化、11 a 滑动平均和样本量
细实线, 平均最高气温; 水平直线, 多年平均值; 粗曲线, 11 a 滑动平均值

要是因为本文的重建是基于高温对树木蒸腾作用的影响. 5, 6 月平均最高气温越高, 蒸腾作用越强, 树木生长越易受到限制. 当平均最高气温比较低时, 树木的蒸腾作用较弱, 它对树木生长的限制作用也弱. 因此, 重建序列中反映的高温变化其可靠性和准确性比低温的要高.

2.3 5~6 月平均最高气温的年代际变化

从图 4 可以清楚地看出, 在过去 646 年中, 5~6 月平均最高气温经历了若干次高低变化. 由于在标准树轮宽度年表的建立过程中, 世纪尺度的低频变化已随生长趋势的去除而消除, 所以本文将集中探讨年代际尺度的变化. 根据 5~6 月平均最高气温重建序列的 11 a 滑动平均值和整个重建时段的均值(13.94℃)的距平, 对 1360 年以来的气候变化进行了冷暖时段

的划分(表 3). 划分的标准是, 当滑动平均值至少连续 11 a 大于均值时定为暖期, 小于均值时定为冷期. 从表 3 中可以看出, 1360 年以来可靠的重建时段中, 持续时间较长且气温显著偏高的时段有 6 个, 即 1438~1455, 1572~1612, 1684~1700, 1730~1754, 1812~1829 和 1853~1886 年. 其中 1438~1455 和 1684~1700 年比多年平均高出 0.8℃. 持续时间较长且气温显著偏低的时段有 5 个, 即 1547~1571, 1701~1729, 1755~1777, 1830~1852 和 1887~1910 年. 其中 1830~1852 年比多年平均低 0.9℃; 在重建序列中, 最近 50 年的 5~6 月平均最高气温对比其之前时段, 没有明显的上

表 3 1360~2005 年杂多 5~6 月平均最高气温的冷暖时段及其距平值

暖期		冷期	
时段	距平值/℃	时段	距平值/℃
1370~1380(11)	0.2	1409~1437(29)	-0.4
1383~1394(12)	0.2	1456~1474(19)	-0.4
1397~1408(12)	0.4	1521~1536(16)	-0.5
1438~1455(18)	0.8	1547~1571(25)	-0.4
1475~1485(11)	0.4	1613~1625(13)	-0.4
1508~1520(13)	0.4	1637~1655(19)	-0.3
1572~1612(41)	0.3	1672~1683(12)	-0.4
1659~1671(13)	0.4	1701~1729(29)	-0.5
1684~1700(17)	0.8	1755~1777(23)	-0.6
1730~1754(25)	0.6	1830~1852(23)	-0.9
1789~1801(13)	0.6	1887~1910(24)	-0.7
1812~1829(18)	0.5		
1853~1886(34)	0.6		
1911~1922(12)	0.5		
1931~1943(13)	0.3		
1969~1984(16)	0.3		

升趋势。

2.4 与其他代用资料和重建序列的对比分析

秦宁生等人^[16]曾在本研究采样点以北 110 km 以外的治多和曲麻莱建立了同树种的标准树轮宽度年表, 并在其研究中也同样发现标准树轮宽度年表与 5、6 月平均最高气温的负相关关系远强于与 5、6 月降水量的正相关关系。将该两条标准树轮宽度年表与本文重建的序列进行了对比, 发现在年际尺度上, 重建序列与曲麻莱标准树轮宽度年表在 518 a 的公共时段里的相关系数是-0.44, 与治多标准树轮宽度年表在 625 a 的公共时段里的相关系数是-0.41。这两个相关系数都通过了 $\alpha=0.0001$ 的显著性水平检验。在年代际尺度的变化上(图 5(a)~(c)) (a)与(b), (c)也有很好的负相关关系。如杂多重建序列中几个高温时期都对应治多和曲麻莱树木径向生长的低值时期。此外, 一些高低温甚至和研究区东北部的阿尼玛卿山区树轮重建的夏半年(4~9 月)平均最高温度^[19]的高低变化在时间上一致(图 5(a), (d))。

重建的杂多标准树轮宽度年表与邻近的曲麻莱、治多标准树轮宽度年表在公共时间段存在极显著的负相关, 这说明新采样数据所反映的历史气候变化信息具有共性和区域代表性; 进一步分析重建平均

最高气温序列与邻近地区反映平均最高气温的标准树轮宽度年表以及与利用树轮重建的平均最高气温的序列的对比发现, 平均最高气温在年代际尺度变化上比较一致; 这进一步表明, 重建序列可靠、合理并具有区域代表性。

3 结论

(i) 青海杂多 5、6 月平均最高气温对标准树轮宽度年表的影响高于同期降水和相对湿度的影响, 平均最高气温与树木径向生长关系最为密切, 表现出极显著的负相关关系。研究区树木生长主要受限于平均最高气温。在降水不足时, 平均最高气温越高, 土壤水分蒸发越强, 树木蒸腾作用越强, 树木生长越易受到限制。依据这些关系重建了该地 5~6 月历史的平均最高气温。从校准时段原始值符号一致性检验、一阶差符号检验、乘积平均 t 值以及误差缩减值 RE 等检验结果来看, 平均最高气温重建采用的回归方程比较稳定, 重建序列是合理可靠的。

(ii) 1360 年以来可靠的重建时段中, 气温显著偏高且持续时间较长的时段有 6 个, 即 1438~1455, 1572~1612, 1684~1700, 1730~1754, 1812~1829 和 1853~1886 年。其中 1438~1455 和 1684~1700 年比多年平均高出 0.8℃。气温显著偏低且持续时间较长的时期有 5 个,

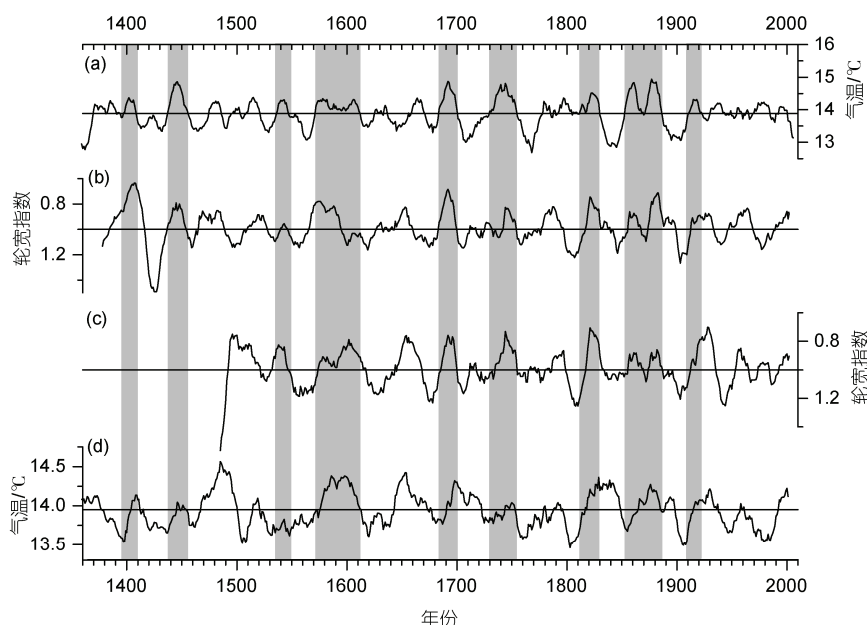


图5 重建的杂多5~6月平均最高气温的年代际变化(a)、治多(b)和曲麻莱(c)的标准树轮宽度年表以及在阿尼玛卿山重建的4~9月夏半年平均最高气温(d)的年代际变化的对比

即 1547~1571, 1701~1729, 1755~1777, 1830~1852 和 1887~1910 年. 其中 1830~1852 年比多年平均低 0.9℃. 在最近的 50 a 中, 重建的 5~6 月平均最高气温没有明显的上升趋势, 这与观测的资料结果一致.

(iii) 重建序列与邻近的曲麻莱、治多标准树轮

宽度年表存在极显著的负相关; 通过与邻近地区反映平均最高气温的标准树轮宽度年表以及与利用树轮重建的平均最高气温的序列的对比, 发现年代际尺度的变化在区域上比较一致; 这进一步表明, 重建序列可靠、合理并具有区域代表性.

致谢 感谢勾晓华教授为本研究提供的树轮宽度年表资料.

参考文献

- 1 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据. 科学通报, 1998, 43: 633—636
- 2 汤懋苍, 李存强, 张建. 青藏高原及四周的近代气候变化. 高原气象, 1988, 7: 39—49
- 3 Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *Int J Climatol*, 2000, 20: 1729—1742
- 4 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276: 1821—1825
- 5 姚檀栋, 刘晓东. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. 科学通报, 2000, 45: 98—106
- 6 王宁练, 姚檀栋, 蒲建辰, 等. 青藏高原马兰冰芯记录的近百年来气温变化. 科学通报, 2003, 48: 1219—1223
- 7 姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 等. 青藏高原达索普冰芯 2 ka 来温度与甲烷浓度变化记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 346—352
- 8 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Holocene climate variability archived in the Puruogangri ice cap on the central Tibetan Plateau. *Ann Glaciol*, 2006, 43: 61—69
- 9 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, 21: 508—513
- 10 强明瑞, 陈发虎, 张家武, 等. 2 ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化. 科学通报, 2005, 50: 1385—1393
- 11 Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, et al. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, Chin. *Clim Dyn*, 2004, 23: 869—881
- 12 Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, et al. A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1739—1741
- 13 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 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: 145—153
- 14 刘禹, 安芷生, 马海州, 等. 青海都兰地区公元 850 年以来树轮记录的降水变化及其与北半球气温的联系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 461—471
- 15 Yin Z Y, Shao X M, Qin N S, et al. Reconstruction of a 1436-year soil moisture and vegetation water use history based on tree-ring widths from Qilian junipers in northeastern Qaidam Basin, northwestern China. *Int J Climatol*, 2007, 28: 37—53
- 16 秦宁生, 邵雪梅, 靳立亚, 等. 青海南部高原圆柏年轮指示的近 500 年来气候变化. 科学通报, 2003, 48: 2068—2072
- 17 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 89—95
- 18 Brauning A, Mantwill B. Summer temperature and summer monsoon history on the Tibetan plateau during the last 400 years recorded by tree rings. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L24205
- 19 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 青藏高原东北部树木年轮记录揭示的最高最低温的非对称变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1480—1492
- 20 刘禹, 安芷生, Hans W L, 等. 青藏高原中东部过去 2485 年以来温度变化的树轮记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 166—176
- 21 Jones P D, Briffa K R, Osborn T J, et al. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *Holocene*, 2009, 19: 3—49
- 22 青海森林编辑委员会. 青海森林. 北京: 中国林业出版社, 1993. 1—497
- 23 Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968. 1—73
- 24 Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976. 1—567
- 25 Grissino Mayer H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program *cofecha*. *Tree-Ring Res*, 2001, 57: 205—221
- 26 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull*, 1983, 43: 69—78

- 27 Cook E R. A time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. Dissertation for the Doctoral Degree. Tuscon: University of Arizona, 1985. 1—171
- 28 Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydro-meteorology. *J Climate Appl Meteorol*, 1984, 23: 201—213
- 29 Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 2005, 25: 693—712
- 30 Mann H B. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13: 245—259
- 31 Kohler M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bull Am Meteorol Soc*, 1949, 30: 188—189
- 32 Fritts H C, Vaganov E A, Sviderskaya I V, et al. Climatic variation and tree-ring structure in conifer: Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density. *Clim Res*, 1991, 1: 97—116
- 33 Michaelsen J. Cross-validation in statistical climate forecast models. *J Clim Appl Meteorol*, 1987, 26: 1589—1600
- 34 蔡秋芳, 刘禹, 宋慧明, 等. 树轮记录的陕西中-北部地区 1826 年以来 4~9 月温度变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 971—977