

祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录*

刘晓宏^{①②} 秦大河^① 邵雪梅^{②**} 陈 拓^① 任贾文^①

(①中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境重点实验室, 兰州 730000; ②中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 对采自祁连山中部的树木年轮样品交叉定年后, 建立了树轮宽度标准指数序列. 通过树轮标准年表与附近气象站观测数据的相关分析表明, 在森林上限, 树木生长主要受温度变化的影响, 年轮宽指数序列中主要包含温度变化的气候信息, 对树轮生长影响最大的气候因子为前一年 12 月~当年 4 月平均温度. 祁连山圆柏轮宽标准指数序列反映的温度变化很好地表现了小冰期降温特征及 20 世纪的全球气温持续变暖趋势. 与祁连山敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 所反映温度变化比较说明, 冰芯和树轮所记录的温度变化趋势基本一致. 轮宽序列表现出的冷暖特征与北半球温度变化存在较好的一致性, 表明祁连山地区气候变化不仅受区域条件的影响, 而且对全球气候变化作出了响应.

关键词 祁连山中部 树轮宽指数 温度变化

在最近 1000 年内, 地球上出现了几个有广泛影响的气候变化事件, 即中世纪暖期、小冰期和 20 世纪的现代变暖^[1,2]. 要查明发生这些气候变化事件的具体特征以及变化规律, 足够长的气候资料序列的获取成为必需. 对过去气候变化资料的获取, 主要通过冰芯记录、黄土沉积、湖泊沉积、珊瑚和树木年轮等各种代用资料来进行.

树木年轮以其精确定年和高分辨率成为获取过去气候与环境变化信息(CLIVAR 和 PAGES 计划)的

重要技术途径之一. 祁连山位于我国干旱区、东部湿润区和青藏高原高寒区的过渡地带, 树木生长对气候变化非常敏感. 20 世纪 70 年代和 90 年代, 在祁连山发现近千年的树木年轮^[3~6], 展现了树木年轮研究的潜力. 但前人的工作主要集中在南坡, 主要反映高原气候变化, 而与北坡相关的研究较少. 近年在祁连山地区利用树木年轮恢复了近千年的出山口径流量的变化^[7]和春季降水的变化^[8,9], 得出非常有意义的结果.

2003-03-26 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(批准号: KZCX1-10-02, KZCX1-10-09)及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯室创新项目(201506)资助

** E-mail: shaoxm@igsnr.ac.cn

依树木年轮气候学原理, 森林上限的树木生长主要受限于温度的变化, 树轮宽度变化中可能包含更多的温度变化信息^[10]. 鉴于前人研究中对祁连山地区过去温度长期变化信息了解较少, 我们在位于祁连山北坡中部腹地甘肃省肃南县西水乡境内的寺大隆林场内, 树木上限附近采集祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)树轮样品, 希望能为了解祁连山地区气候长期变化特征及其与其他地区气候变化的差异提供信息.

1 研究区环境及树轮年表建立

祁连山(36°30'~39°30'N, 93°31'~103°E)地处青藏高原的东北缘, 位于青藏、蒙新、黄土三大高原交汇地带, 气候受大陆性气候和青藏高原气候的综合影响, 属温带半干旱区. 作为重要的地理气候分界线, 祁连山在我国自然地理上占有非常重要的地位.

祁连山气候特征表现为温度变幅大, 雨量分配不均; 温度和降水随海拔高度呈明显垂直梯度; 降水总趋势从东到西减少, 从南到北降低, 雪线由东向西升高. 据寺大隆专业气象观测资料, 该区极端最高气温达 28.5~32.4℃, 最低为-27.8~-29.0℃, 年均降水量为 401.9~632.3 mm, 年均蒸发量为 1041.2~1234.2 mm, 空气相对湿度在 58%左右.

祁连山森林资源比较复杂, 主要树种有青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等. 青海云杉林分布于海拔 2400~3200 m 的阴坡和半阴坡上; 祁连圆柏分布于海拔 2700~3400 m 的阳坡和半阳坡上. 土壤为山地灰褐土, 因林分稀疏, 表土流失, 土壤退化严重.

祁连圆柏样品于 2000 年 10 月采自甘肃省肃南县西水乡境内的寺大隆林场(图 1), 海拔高度为 3400~3550 m. 所取树木年轮样本接近树木上限, 位于陡峭的阳坡(99°56'E, 38°26'N), 坡度在 42°左右, 郁闭度较小, 树木受人类活动影响较小. 用生长锥所取的 60 个树芯来自 25 棵树龄较长的健康立木.

依据树木年轮分析的基本程序^[10]并借鉴在干旱区树轮工作的程序^[11], 首先对树芯样本进行预处理和初步定年, 然后进行年轮宽度的量测, 并利用

COFECHA^[12]进行交叉定年和轮宽量测准确性检验. 采用该程序缺省值所计算样芯序列间的平均相关系数为 0.614, 平均敏感度 0.255, 缺轮百分比 0.166%. 最长的样芯序列为 1110 年, 到公元 1000 年时, 已有 4 棵树的 6 个样芯. 考虑到复本原理, 最终分析的时段为公元 1000~2000 年. 根据 COFECHA 程序的结果且在保证复本量的前提下, 将 5 条与其他序列相关程度较低并有奇异值的样芯序列从分析中去除.

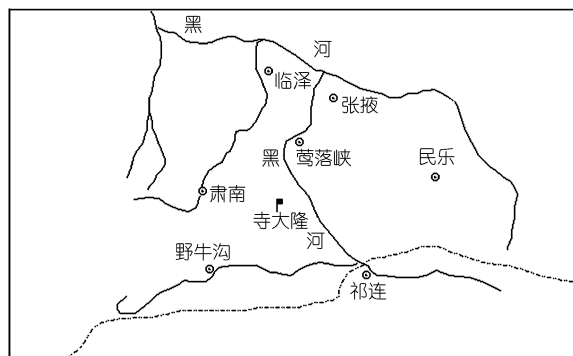


图 1 采样点及气象站点位置示意图

为保留更多的低频信息, 且考虑到采样点郁闭度较小, 采用负指数函数和斜率为负数的回归方程对生长趋势进行拟合. 将去趋势序列以双权重平均法, 通过 ARSTAN^[13]程序合成标准轮宽年表(图 2). 该年表的平均敏感度为 0.18, 均方差 0.21, 一阶自相关系数 0.49. 在 1391~1990 年的 600 年公共区间分析中, 树间、树内和所有序列的平均相关系数分别为 0.36, 0.68 和 0.37; 信噪比为 8.9; 所用样本的总体代表性为 0.90; 第一主成分的方差解释量为 40.84%. 在公元 1000 年时已有 4 棵树的样本, 它们对所用样本的代表性为 0.70, 到公元 1100 有 6 棵树的 9 个样芯时, 该值接近 0.80, 信度较大.

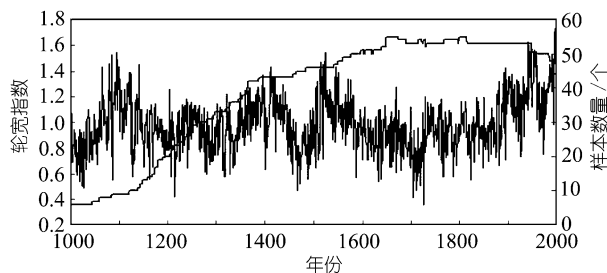


图 2 祁连圆柏宽度标准年表及样本量曲线

2 树轮宽度指数与气候要素的关系

为了探讨祁连山中部祁连园柏生长状况与气候要素的关系, 选择了采样点周围的高山气象站和平原气象站(张掖、武威、民乐、野牛沟、肃南、祁连和莺落峡)建站以来的月平均温度和月降水量资料进行分析. 气候观测资料与轮宽指数序列自上年 1 月至当年 10 月的相关函数分析初步结果表明, 树木生长和温度的关系远比和降水的关系密切; 在所选站点中与张掖和民乐两个气象站温度关系最为密切, 表 1 列出了这两个站点气候要素以及莺落峡站径流量资料与轮宽指数序列的密切相关时段(上年 12 月~当年 9 月)的相关分析结果.

从表 1 可以看出, 温度对树木生长影响较为稳定, 并分为两个时段: 上年 12 月~当年 4 月以及当年的

6~9 月. 除 5 月以外, 全年其余时段平均温度对树轮生长均为正影响, 即高温与宽轮相对应. 尽管在冬季及早春时节树木的分生组织处于休眠期, 但高温则利于树液免受冻害^[14], 使其在下一个生长季来临时, 有能力迅速在体内展开生理活动, 形成产生宽轮的潜能. 生长季开始后, 在保证水分的前提下, 高温有利于光合作用, 从而产生宽轮. 树轮宽度标准年表中一个非常明显的特征, 即公元 1998 最暖年导致了 1999 年树木生长最佳, 从而形成了所有年轮中的最宽年轮, 所以树轮宽度的变化中主要反映温度变化的信息. 降水的影响稳定性小, 主要体现在树轮宽度与民乐站前一年 12 月至当年 1 月和 5 月的降水量均有明显的正相关. 树轮宽度与莺落峡的径流量也存在比较好的相关性, 与康兴成等^[7]的研究结果一致.

表 1 祁连园柏年轮宽度指数与气候要素之间的相关系数

月份	张 掖		民乐		莺落峡	
	平均温度	降 水	平均温度	降水	降水	径流量
P/12	0.221	0.064	0.448	0.414	0.032	0.359
1	0.080	0.344	0.318	0.516	0.352	0.235
2	0.196	0.011	0.443	-0.101	0.066	0.267
3	0.304	0.192	0.391	0.275	0.154	0.450
4	0.445	-0.060	0.524	0.270	-0.046	0.283
5	-0.195	0.101	-0.082	0.366	0.098	0.038
6	0.217	0.066	0.504	0.256	0.181	0.356
7	0.332	-0.001	0.420	0.196	0.036	0.327
8	0.212	-0.023	0.460	-0.043	0.012	0.101
9	0.355	-0.211	0.432	-0.138	-0.232	-0.220

a) P 为上一年气候要素

为了进一步了解树轮宽度与主要气候要素之间关系, 将气候要素的不同月份进行组合, 并且对树轮宽度指数和气候要素数据在时间上进行了 11 年滑动平均和一阶差处理, 看在不同频率上的关系. 表 2 列出了部分相关分析结果. 在逐年的相关分析上, 树轮宽指数与不同月份组合的气温、降水和径流量均密切相关. 考虑到降水对树木生长的影响不可避免, 进行了偏相关分析, 结果表明分别固定民乐站 12 月至 1 月和 3 至 6 月的降水量对树轮宽度的影响后, 树轮和气温之间的相关系数仍达显著程度, 说明温度对树木生长的显著影响是存在的; 经 11 年滑动平均后, 温度与年轮宽度指数的相关系数显著提高, 除去因 11 年滑动平均造成的自由度减小^[10]影响, 相关系数

超过 0.01 的信度检验水平; 降水量和径流量和与年轮宽指数关系提高不明显或有所下降且未达显著水平; 一阶差的结果表明树轮序列中高频变化信息对

表 2 不同时段气候要素与树轮宽指数的相关系数

时段(月)	年值	11 年滑动平均	一阶差
张掖温度(1951~2000)			
12/P~4	0.433	0.823	0.243
6~9	0.417	0.732	0.097
民乐温度(1959~2000)			
12/P~4	0.578	0.920	0.138
6~9	0.467	0.767	0.035
民乐降水(1959~2000)			
12/P~1	0.605	0.461	0.456
莺落峡径流量(1948~2000)			
11/P~4	0.452	0.687	0.392

气候要素的反映较少. 因此, 可以认为树轮宽度变化主要代表温度的低频变化.

3 树轮宽度变化与器测资料及其他代用资料的对比

为了进一步验证树轮宽窄对温度变化的代表性, 将轮宽变化与仪器记录的温度变化进行了对比分析 (图 3). 首先是与青藏高原的气候记录^[15]对比, 在 3 年滑动平均的曲线上可以看出, 两者反映的温度变

化趋势基本一致, 特别是在 20 世纪 60 年代后期的低温与自 80 年代以来的明显升温过程上; 由于祁连山位于青藏高原的东北缘, 在一些变化细节上与整个高原存在差异. 在与器测的近百年来中国温度变化^[16]和北半球温度变化^[17]的比较中发现三者之间存在较好的一致性, 树轮宽指数与中国温度序列的相关系数达 $0.504(n = 106)$, 20 世纪 40~50 年代的升温和 60~70 年代的降温过程基本一致; 树轮宽指数与北半

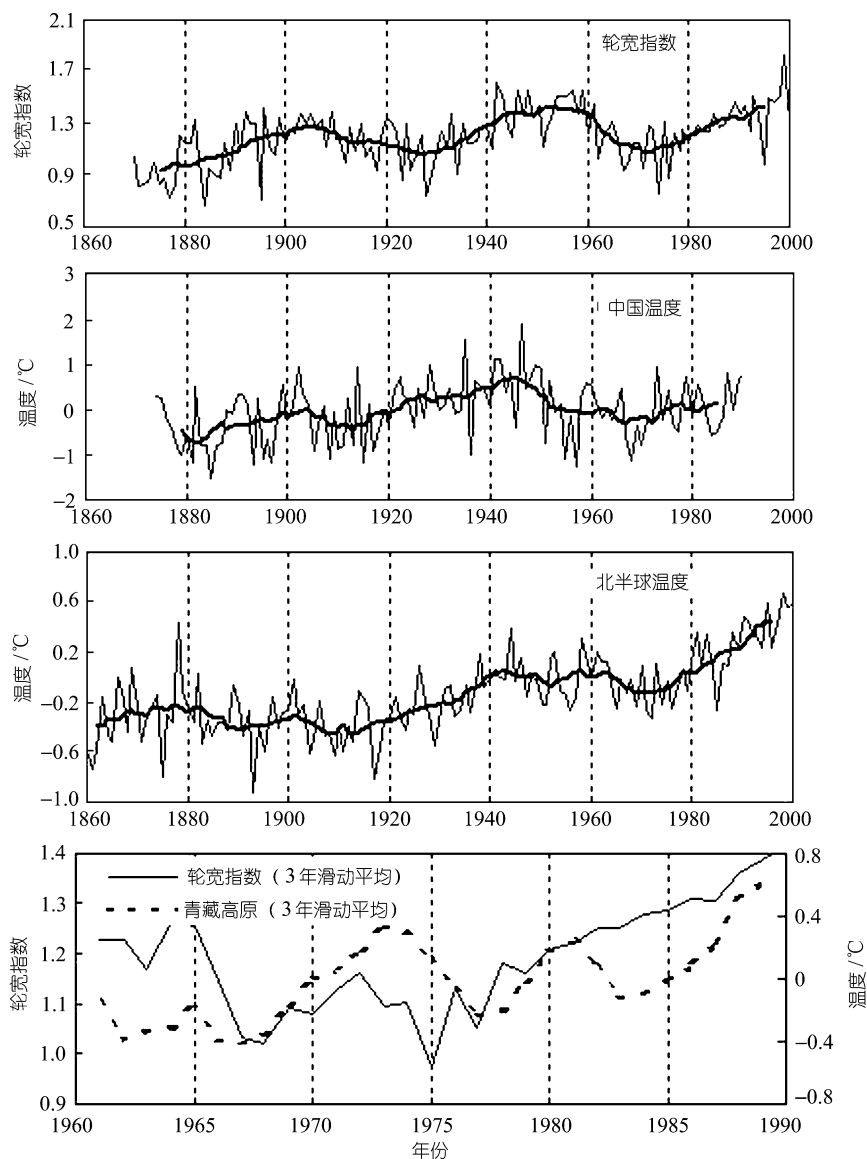


图 3 树轮宽度标准指数与仪器观测资料的对比

青藏高原温度引自文献[15]; 中国温度引自文献[16]; 北半球温度引自文献[17]

球温度的相关系数为 0.302 (1870~2000 年), 经 11 年滑动平均后, 相关系数达到 0.598. 以上比较表明, 祁连圆柏年轮宽度变化较好的记录了区域气温变化的信息, 同时对全球 20 世纪气候变暖作出了显著响应.

在与其他代用资料的比较中(图 4)发现, 树轮宽度指数与敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[18]有较好的对应关系, 这是因为祁连山敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化主要代表了温度变化, 其高值期代表温暖期, 低值则代表寒冷期^[19,20]. 此外, 两者在地域分布上距离最近, 在过去近 600 年间, 几乎经历了相同的变化, 特别是小冰期时期和 20 世纪表现出很好的同步性, 仅公元 1690~1700 年冰芯记录中的高值在树轮记录中未体现出来. 将树轮记录与利用历史文献所重建的中国东部冬半年温度记录^[21]进行比较, 总体看来在大的冷暖期出现时间上基本一致, 但在持续时间和强度上

有所不同. 当然, 由于地区不同, 变化存在一定差异, 如公元 1665~1721 年间两者差异较大. 我们进一步将树轮宽指数序列与北半球温度^[22]进行比较, 发现树轮宽序列与北半球温度也有较好的一致性, 相关系数为 0.2113 (1000~1993), 经 11 年滑动平均后, 相关系数提高到 0.398, 这说明祁连圆柏年轮宽度可反映较大范围的温度变化.

表 3 中统计了过去 1000 年树轮记录、敦德冰芯^[18]、中国东部东半年温度^[21]、北半球温度记录^[22]的冷暖变化. 对于祁连山早期的树轮资料结果^[3~5], 由于样本量不足, 定年不够准确, 未进行响应函数分析, 所以该资料的准确性需要进一步验证补充. 祁连圆柏树轮记录中的冷暖期与敦德冰芯记录、中国东部冬半年温度记录十分接近, 但不同记录之间冷暖变化的变化幅度和持续的时间存在差异. 在所研究的

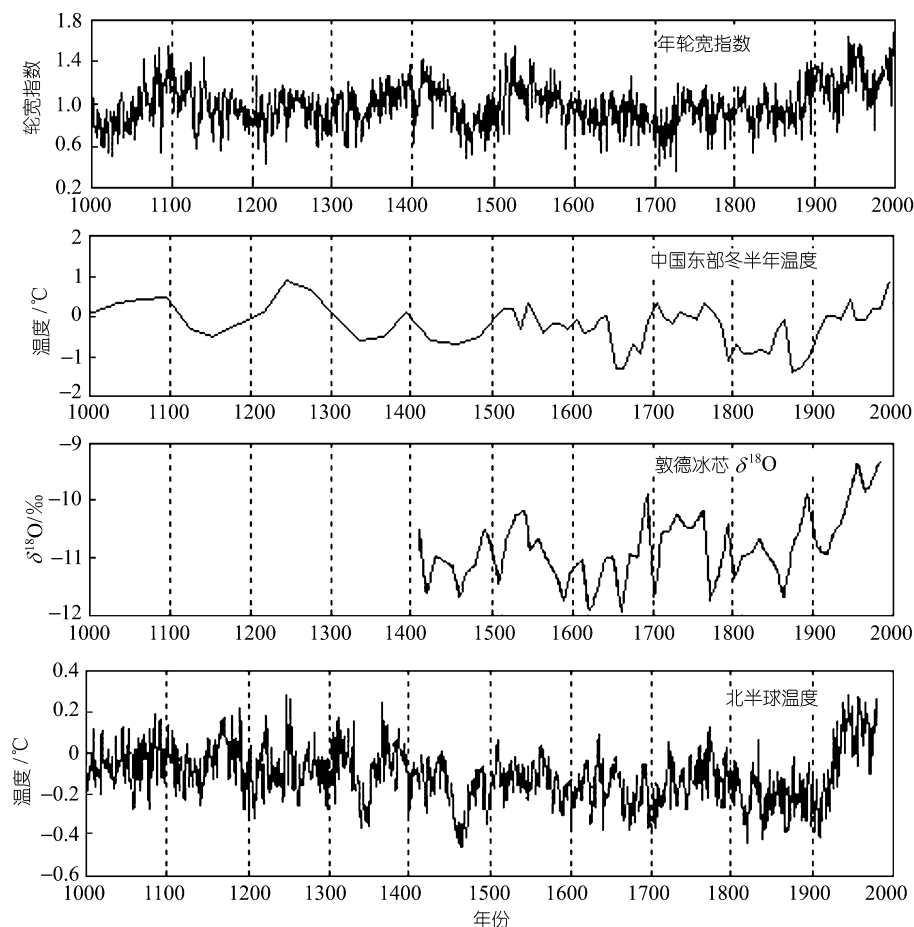


图 4 祁连圆柏年轮宽指数与其他代用指标的对比

敦德冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 引自文献[18]; 中国东部冬半年温度引自文献[21]; 北半球温度引自文献[22]

表 3 祁连圆柏轮宽反映的温度变化与其他代用指标的比较

祁连圆柏记录		敦德冰芯 ^[18]		中国东部冬半年温度 ^[21]		北半球记录 ^[22]	
冷期	暖期	冷期	暖期	冷期	暖期	冷期	暖期
1000~1050	1050~1150			1110~1200	1000~1110	1000~1160	1160~1110
1150~1350	1350~1440			1300~1500	1200~1300	1110~1150	1150~1200
1440~1510	1510~1580	1420~1520	1521~1570	1550~1700	1500~1550	1200~1260	1260~1330
1580~1890	1890~2000	1570~1680	1680~1770	1780~1910	1700~1780	1330~1360	1360~1400
		1770~1890	1890~1980		1910~2000	1400~1500	1500~1580
						1580~1610	1610~1660
						1660~1710	1710~1810
						1810~1910	1910~1993

祁连圆柏记录和中国东部冬半年温度中，较明显的差异是西北冷暖期出现较东部早，可能是中国的气候变化从西部向东部发展，而这种现象产生的原因可能与青藏高原是我国气候变化的启动区有关^[23]。

4 祁连圆柏宽度变化所反映的世纪尺度的温度变化特征

综上所述，祁连山树轮宽度变化很好地代表了温度的变化，特别是对 17 世纪的小冰期和 1880 年以后的明显升温过程及 20 世纪 70 年代的降温过程均有较好的体现。如果利用树轮宽度变化代替温度变化并以世纪尺度来讨论过去 1000 年的温度变化，可以分为以下几个阶段：

(1) 公元 1050~1150 年间的温暖期。此时段的气候变暖在关于我国东部的文献记录和 Mann 重建的北半球温度序列中均有所体现。(2) 公元 1150~1350 年间的寒冷期。在此时段，温度也有所回升，如在公元 1250 年曾温度较高。但总体来说，这一时段温度偏低。(3) 公元 1350~1440 年间相对温暖期。在此时段有一降温阶段，出现在公元 1400 年左右。(4) 公元 1440~1510 年间的寒冷期。该时期为一较强的降温阶段，在敦德冰芯记录、中国东部文献记录和北半球温度序列中均有记录。(5) 公元 1510~1580 年间的温暖期。从公元 1510 年起温度迅速升高，之后开始持续降温，但整体以温暖为主；(6) 公元 1580~1890 年间的寒冷期，即“小冰期”阶段。这一阶段有幅度较小的冷暖波动，但寒冷的幅度远大于温暖的，且以冰期特征为主，最冷时段为 1680~1720 年。(7) 公元 1890~2000 年持续升温阶段。整个阶段经历了两个升降和 1 个升温过程，从 19 世纪末到 20 世纪 20 年代

为第一个升降温过程，20 世纪 20~70 年代为第二个升降温过程，之后气温一直上升，并以 20 世纪的最后几年最温暖为特征。这一升降更替和持续增暖的趋势，在中国和全球的许多气候资料^[24~26]中均得到体现。因此，祁连圆柏宽度变化所反映的温度变化不仅可以反映中国气温变化，而且在世纪尺度上对北半球甚至全球气温的持续增暖也作出了响应。

5 讨论与结论

树木年轮的生长受制于多种气候要素的共同影响，不同的生长环境下气候要素对树轮生长的贡献有所不同。本文所用树轮资料的采样点与重建黑河出山口径流量所用树轮资料^[7]的采样点在空间距离上很近，因此将本研究的树轮宽度标准序列与该研究中的树轮宽度标准序列以图形进行了比较，并与恢复的径流量进行了定量的比较(图略)。由此可以看出，两条树轮宽度标准序列之间有一些相同的变化，但在世纪尺度的变化趋势上有较大差异。此外，本文的树轮宽度变化主要反映的是温度变化，而该文中的树轮年表主要反映降水和径流的变化^[7]。由于本文所用样芯的最低海拔高度为 3400 m，比该文的高出 300 m，采样高度的不同会造成一定的差异，然而，具体的结果有待于进一步的研究。

从本文所建的序列同器测资料和其他代用资料的比较可以看出，所建序列在年代际和世纪尺度的变化上，对温度变化反映得很好，但北半球温度变化序列中 20 世纪前近千年的温度下降趋势^[22]在本文所建的序列中未能表现。由于在树轮年表建立过程中需要去除与树木年龄相关的生长趋势，而在本文中 so 采集的样芯中又没有超过 1500 年树龄的，有可能

在去除与树木年龄相关的生长趋势的同时也去除了千年尺度的温度变化趋势. 因此, 在目前常规的去生长趋势方法下, 千年长度的树轮宽度变化对讨论年代际和世纪尺度的变化是较可靠的. 对千年长度的超低频变化的反映需要在去生长趋势的方法上有所改进.

本文通过对取自祁连山中部祁连园柏树轮样品的标准定年, 建立了树轮宽度标准指数序列. 将标准指数序列与附近的气象站观测值进行了相关分析, 并与器测气候资料和代用资料及重建曲线进行了对比, 结果表明: (1) 祁连山中部树木上限树木的生长主要受温度变化影响, 与较低海拔年轮宽度反映了不同的气候信息. 标准指数年表主要包含温度变化的信息, 对树轮生长最主要的影响因子为前一年 12 月~当年 4 月的平均温度. (2) 祁连园柏宽度反映的温度变化较好表现了小冰期降温特征及 20 世纪的全球气温上升趋势. 公元 1998 年为 20 世纪最暖年, 导致公元 1999 年树木生长最佳. (3) 树轮宽度指数与敦德冰芯氧同位素记录所记录的温度变化信息表现出了比较好的一致性, 反映祁连山区温度变化区域性一致特征. 与北半球温度的对比, 表明祁连山树轮宽度所反映的温度变化不仅体现了中国温度变化, 而且对全球温度变化也作出了响应.

参 考 文 献

- 1 IPCC. Summary for policymakers, a report of WGI to IPCC. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2001. 2~11
- 2 王绍武, 董光荣, 主编. 中国西部环境特征及其演变(第一卷). 见: 中国西部环境演变评估. 北京: 科学出版社, 2002. 37~43
- 3 卓正大, 胡双熙, 张先恭, 等. 祁连山地区树木年轮与我国近千年的(1059~1975)的气候变化. 兰州大学学报, 1978(2): 145~157
- 4 王玉玺, 刘光远, 张先恭, 等. 祁连山园柏年轮与我国近千年气候变化和冰川进展的关系. 科学通报, 1982, 21: 1316~1319
- 5 刘光远, 王玉玺, 张先恭, 等. 祁连山近千年的年轮气候及其在冰川上的反映. 中国科学院兰州冰川冻土所集刊. 1984, (5): 97~108
- 6 张志华, 吴祥定. 利用树木年轮资料恢复祁连山地区近 700 年来气候变化. 科学通报, 1997, 42(8): 849~851
- 7 康兴成, 程国栋, 康尔酒, 等. 利用树木年轮资料重建黑河近千年出口径流量. 中国科学, 2002, 32(8): 675~685
- 8 王亚军, 陈发虎, 勾晓华. 利用树木年轮资料重建祁连山中段春季降水的变化. 地理科学, 2001, 21(4): 374~377
- 9 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 等. 利用树轮宽度重建近 280 年来祁连山东部地区的春季降水. 冰川冻土, 2001, 23(3): 292~296
- 10 Fritts H C. Tree ring and climate. London: Academic Press, 1976. 1~567
- 11 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木东缘山地千年祁连圆柏年轮定年分析. 地理学报, 2003, 58(1): 90~100
- 12 Holmes R L. Computer assisted quality control in tree ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69~75
- 13 Cook E R, Holmes R L. Users manual for ARSTAN. Lab of Tree Ring Research, University of Arizona, Tucson, 1986
- 14 Kimmins J P. Forest Ecology. New York: Macmillan Publishing Company, 1987. 1~531
- 15 刘晓东, 张敏峰, 惠晓英, 等. 青藏高原当代气候变化特征及其对温室效应的响应. 地理科学, 1998, 18(2): 113~121
- 16 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. 大气科学, 1995, 19(5): 525~534
- 17 Folland C K, Kahl T R. Observed climate variability and change. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2001. 99~181
- 18 姚檀栋, 谢自楚, 武筱玲. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. 中国科学, B 辑, 1990, 11: 1196~1201
- 19 谢自楚, 武筱玲, 姚檀栋, 等. 敦德冰岩芯古气候环境的初步研究. 第四纪研究, 1989(2): 135~140
- 20 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5ka 温度变化. 中国科学, B 辑, 1992, 10: 1089~1093
- 21 Ge Quan-sheng, Zheng Jingyun, Fang Xiuqi, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of yellow river and Yangtze river during past 2000 years. Holocene, 2003, 13(6): 933~940
- 22 Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. North Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations. Geophysical Research Letters, 1999, 26(6): 759~763.
- 23 冯 松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化气动区的新证据. 科学通报, 1998, 43(6): 633~636
- 24 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. 第四纪研究, 1998, (1): 54~64.
- 25 秦大河, 主编. 中国西部环境演变评估综合报告(综合卷). 见: 中国西部环境演变评估. 北京: 科学出版社, 2002. 8~9
- 26 Wang Shaowu, Gong Daoyi, Zhu Jinhong. Twentieth-century climatic warming in china in the content of the holocene. Holocene, 2001, 11(3): 313~321