

树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化^{*}

邵雪梅^① 黄 磊^① 刘洪滨^② 梁尔源^① 方修琦^③ 王丽丽^①

(^①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^②中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

^③北京师范大学, 北京 100875)

摘要 通过在青海柴达木盆地东北缘宗务隆山和沙利克山建立的 7 条大复本量的祁连圆柏年轮宽度序列和树木径向生长对气候要素变化的响应分析, 重建了德令哈地区过去千年以来上 1 年 7 月至当年 6 月的年降水量变化历史. 结果表明, 该区祁连圆柏轮宽序列有明显的年际间变化和较强的公共信号, 是很好的气候代用资料; 祁连圆柏的生长主要受水分的限制; 利用 7 条轮宽序列所提取的第一主成分重建上一年 7 月~当年 6 月年降水量, 重建方程的方差解释量高达 63.1%, 且方程稳定; 在重建的过去千年年降水量变化中, 多降水期主要为 1520~1633 年和 1933~2001 年, 而少雨期主要为 1429~1519 年和 1634~1741 年. 此外, 在 1430 年以前年降水量的变化幅度较小, 在 15 mm 左右, 但在 1430~1850 年间变化幅度增大至 30 mm 左右, 1850 年之后变化幅度有所下降, 并且高值的振幅大于低值的振幅. 20 世纪 90 年代以来, 与温度进一步升高的趋势相反, 降水有下降趋势. 近几百年内与敦德冰川累积量和微粒含量的较好一致性说明, 本文所重建的降水量变化是比较可靠的, 并在区域上有一定的代表性. 本文所重建的过去千年来年降水量的变化对了解世纪尺度的气候变化规律, 为气候模式的验证和 21 世纪气候变化的趋势预测提供了基础数据.

关键词 柴达木东北缘山地 祁连圆柏轮宽序列 千年降水量重建

利用高分辨率代用资料复原过去气候变化史实是当前过去全球变化研究和气候变化研究的重要内容^[1~3]. 树轮在该研究中发挥着重要作用, 北半球近千年及过去 2000 年来温度变化序列的重建^[4~7]、火山爆发对温度的影响^[8]、南方涛动指数序列的重建^[9]等研究充分利用了树轮资料的优势.

我国柴达木盆地东缘山地上生长着千年树龄的

祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom), 这为研究该区过去环境变化提供了很好的材料. 从 20 世纪 70 年代起, 我国学者就开始在该地区利用祁连圆柏进行气候变化研究, 但所有研究^[10~11]均认为该地祁连圆柏轮宽变化反映温度的变化. 然而, 祁连圆柏的生境和较高的缺轮百分比暗示了水分应是祁连圆柏生长的主要限制因子. 为了揭示祁连圆柏年轮轮宽序列中所记

2003-05-18 收稿, 2003-08-01 收修稿稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1998040811)、中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-314)和国家重点科技项目(批准号: 2001-BA611B-01)共同资助

SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences

录的气候信号,本研究在盆地东北缘山地多个样点采集大复本量的树轮样本,建立了树轮宽度指数序列,分析树木径向生长与气候要素变化之间的关系,并在此基础上重建近一千年来的气候变化.本研究所重建的过去千年来的气候变化将对了解青藏高原上世纪尺度的气候变化规律,为气候模式的验证和 21 世纪气候变化的趋势预测提供基础数据.

1 资料与方法

1.1 样点环境及采样

本文所用树轮资料采自青海海西州的宗务隆山和沙利克山,它们位于青海湖西面,柴达木盆地东北边缘.柴达木盆地的东部海拔高度约 2900~3000 m,属干旱荒漠草原^[12],年平均气温 2~4℃,降水自东向西递减,年降水量为 150~200 mm^[13].在盆地东部中山海拔高度约 3500~4000 m 左右,是山体最大降水带^[13],在此带的阳坡和半阴坡上有祁连圆柏林地,且呈带状分布.宗务隆山为该树种分布的最西界^[14].

表 1 展示了采样点的概况及树轮样芯采集的复本量. DLH1~DLH5 位于宗务隆山上,其中 DLH1 和 DLH2 相距很近,直线距离约 2 km,但坡向不同. WL3 和 WL4 同位于沙利克山,坡向也不同,相距直线距离约 19 km. DLH2 和 WL4 相距最远,约 137 km. 树轮样芯是利用生长锥采集的,样本分别采集于 1998 年 9 月、2001 年 6 月、10 月以及 2002 年 9 月,采样点高度为 3600~4000 m,坡向基本为阳坡或半阴坡,坡度 10~30°,缓坡覆盖有 20~50 cm 厚由黄土物质形成的土壤层,在陡坡上土壤层很薄甚至缺失.样点均为祁连圆柏纯林,树高大致为 3~6 m,林分极度稀疏,郁闭度一般在 0.2 以下.由于采样点位于干旱地区,缺失轮和伪轮较多^[15],为了防止在一个样地所采的

所有树芯在某一年均发生缺轮,以及利于样芯定年,在采样时应用了大复本量,采集树龄长短不同、小生境不同的样芯,以及多样点采样等策略,并对某些树采集了 2 个以上的样芯.

1.2 树轮宽度指数序列建立

将树芯样本在实验室进行凉干、固定、打磨等预处理^[16]后,用骨架示意图法^[17]对所有采集的树芯进行了初步交叉定年,以 0.01 mm 精度的轮宽量测仪进行轮宽测量,之后用 COFECHA^[18]程序对定年和量测进行了检验.针对研究区极窄轮和缺失轮较多的特点,在定年及安放缺失轮时,对常规定年方法进行了改进,并采取措施进行检验^[15].表 2 列出了对所有树芯进行定年检验时 COFECHA 输出统计量,以及 AD 1100 年之前的样本量.7 个样点中只有 DLH4 略短于 1000 a,其余均长于 1100 a,最长的树芯在 DLH3,始于 AD 404 年.

由于采样时,采集了树龄长短不同、小生境不同的样芯,在建立树轮宽度指数序列前,先对树芯进行筛选.去除的标准是年代短,平均相关系数低,以及一棵树多于 2 个树芯的样芯.表 3 展示了所用树芯的 COFECHA 输出统计量,与表 2 相比,序列平均相关系数均略有提高,说明序列间的变化共性有所增加.

因为研究区位于干旱区,采样点林分稀疏,郁闭度低并呈散生状态,所以采用负指数函数或回归系数为负号的线性回归拟合了每个点的生长趋势,以加权平均法将去生长趋势序列合并成树轮宽度指数序列.由于采用商去除生长趋势,所建立的树轮宽度指数序列是一条无量纲、平均值为 1、最小值为 0 的序列.该序列是以 ARSTAN^[19]程序建立的.为了比较不同样点间树轮宽度指数序列的质量,对每个样点

表 1 德令哈和乌兰采样点概况

代码	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
北纬	37°28'14"	37°28'05"	37°27'5"	37°26'19"	37°26'59"	36°44'52"	36°40'46"
东经	97°14'06"	97°13'44"	97°32'33"	98°03'23"	97°47'06"	98°13'13"	98°24'56"
海拔高度/m	3730	3780	3920	3660	3700	3720	3700
坡向	西偏北 30°	南偏西 20°	南偏西 10°	北偏西 15°	南	北偏西 15°	南偏西 20°
坡度	30	22	20	13	31	19	18
复本量(株/样芯)	31/61	34/73	44/94	32/68	35/73	43/99	50/103

表 2 采样点交叉定年统计量及 AD 1100 年之前的样本量分布

代码	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
起始年(AD)	843	828	404	1005	757	681	900
定年总轮数	40617	50106	73118	38971	49014	72085	75698
序列相关系数	0.66	0.72	0.82	0.78	0.80	0.76	0.79
平均敏感度	0.35	0.43	0.43	0.50	0.60	0.50	0.47
平均标准差	0.16	0.16	0.17	0.18	0.15	0.14	0.19
缺轮百分比	0.99	1.88	1.53	2.12	3.94	2.33	2.04
AD 800 (株/样芯)	/	/	2/3	/	1/2	2/2	/
AD 850 (株/样芯)	1/1	1/1	2/3	/	2/3	4/6	/
AD 900 (株/样芯)	2/3	2/2	2/3	/	2/4	6/9	1/1
AD 950 (株/样芯)	2/3	6/8	2/3	/	2/4	9/14	3/5
AD 1000(株/样芯)	2/4	11/14	5/10	/	4/6	9/22	9/12
AD 1050 (株/样芯)	4/6	14/20	10/17	2/3	7/11	14/29	13/21
AD 1100 (株/样芯)	10/15	16/28	12/20	2/4	12/18	18/37	17/29

进行了公共区间分析,所取的时间段为 1400~1899 年,共 500 a. 还对 7 条树轮宽度指数序列进行了相互间的相关分析,检查不同样点间树轮宽度随时间变化的一致性. 为了保证重建序列的可靠性,并考虑到在 AD 1000 年时 7 条序列中有 5 条已达到 85%可靠代表性,便将研究时段的起始年截止到 AD 1000 年.

表 3 采样点建立树轮宽度指数序列所用树芯的交叉定年统计量

代码	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
样本量(株/样芯)	25/41	25/41	22/42	27/46	24/47	23/43	25/42
序列平均相关系数	0.68	0.75	0.82	0.79	0.82	0.77	0.83
平均敏感度	0.36	0.45	0.45	0.51	0.62	0.50	0.52
平均标准差	0.16	0.17	0.17	0.17	0.15	0.13	0.19
缺轮百分比	0.98	2.05	1.82	2.26	4.29	2.18	2.70
问题段	4	4	3	0	0	4	1

1.3 气候资料

所用气候资料来自距树轮采样点较近的德令哈(37° 22' N, 97° 22' E, 2981.5 m)、都兰(36° 18' N, 98° 06' E, 3191.1 m)和乌兰(36° 55' N, 98° 29' E, 2950.0 m)气象站,采用的气候要素是自建站以来的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量、月蒸发量、月平均相对湿度和月平均水汽压共 7 个要素. 由于气象站均经历过迁址、更换仪器等会引起资料非均一性变化的事件,还利用了网格点(37.25°N, 97.25°E)月平均气温和月降水量资料^[20]以及邻近区香日德(36° 04' N, 97° 48' E, 2905.4 m)、大柴旦(37° 51' N, 95° 22' E, 3173.2 m)、茶卡(36° 47' N, 99° 05' E, 3087.6 m)站点的资料对所用 3 个站点资料进行了对

比分析. 德令哈站 1977 年 8 月记录降水量为 137.1 mm, 通过与都兰、香日德、大柴旦、茶卡和网格点同期数据对比,认为该值不反映大的空间变化,通过与网格点资料回归,将其调整到 22.1 mm. 德令哈站气象记录可利用时段为 1956~2001 年,乌兰站为 1981~2001 年,都兰站为 1954~2001 年,网格点资料为 1951~1995 年.

1.4 响应分析与转换函数

首先利用散点图检查了树轮宽度指数序列和气候要素序列之间变化的具体关系形式,之后利用数理统计中相关分析方法分析了树木径向生长对气候要素的响应. 因为在采自 10 月初的树芯中可见到当年晚材细胞已基本形成,所以采用分析时段为上一年 1 月至当年 9 月. 为了排除气候资料之间相关性所引起的影响,采用了偏相关分析^[21]方法对个别月份的影响进行了检验. 在检查相关分析所得结果稳定性时,采用单年分析方法^[22],即检查发生树轮宽度最大和最小年份的气候要素状况.

在建立转换函数时,为了最大限度地利用这 7 条近千年的树轮宽度指数序列所反映的大尺度空间和时间变化特征,对它们进行了主成分分析,提取变化方向一致的第一主成分代表该研究区主要树木径向生长变化. 应用数理统计中的回归分析方法在气候要素序列和树轮宽度指数序列的第一主成分间建立一元回归方程,在选取具体重建要素和重建时段时,考虑到重建序列的可利用度,最后选取的因变量为上年 7 月至当年 6 月年降水量. 这种月份组合的年降

水量与一般由 1~12 月计算的年降水量之间年际相关系数为 0.63, 进行 5 a 滑动平均后, 相关系数提高到 0.95, 因此本文所重建的年降水量变化可以代表一般意义上年降水量变化. 由于气象资料短于 50 a, 在对校准方程进行验证时, 采用了交叉验证方法^[23].

2 结果与分析

2.1 树轮宽度序列

表 4 列出了树轮宽度序列统计量与公共区间分析结果. 可以看出, 它们与其他半干旱地区的树轮序

列^[24,25]有相同的特征, 即有较高平均敏感度、标准差、相关系数和对总体的代表性^[26]. 但与半干旱区同树种轮宽序列的统计量^[27]相比, 除 DLH1 外, 其他 6 条序列的均比半干旱区的要高, 说明生长环境的差异. 本文所建 7 条序列间的这些统计量变化与缺轮百分比(表 3)有关, 即缺轮百分比大的, 这些统计量也高. 这些较高的统计量说明研究区祁连圆柏轮宽序列有明显的年际间变化及较强的公共信号, 是用于气候变化研究的很好的代用资料.

图 1 展示了 7 条树轮宽度指数序列的年际变化以

表 4 采样点树轮宽度序列的统计量及公共区间(1400~1899 年)分析结果

	代码	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
序 列 统 计 量	序列起止年(AD)	843~2001	828~2001	404~2001	1005~2002	757~2002	681~2001	900~2001
	均值	0.98	0.99	1.00	0.98	0.98	0.99	0.98
	平均敏感度	0.23	0.32	0.36	0.39	0.47	0.37	0.42
	平均标准差	0.25	0.32	0.35	0.34	0.44	0.37	0.39
	一阶自相关系数	0.44	0.38	0.40	0.26	0.40	0.41	0.37
公 共 区 间 分 析 结 果	SSS ^a (年/株)	1115/12	982/10	1000/7	1199/6	972/5	883/6	977/5
	样本量(株/样芯)	16/26	16/24	20/37	15/23	21/35	16/29	21/32
	所有样芯平均相关系数	0.34	0.38	0.47	0.50	0.59	0.51	0.58
	树间相关系数	0.32	0.37	0.47	0.49	0.59	0.50	0.58
	树内相关系数	0.81	0.73	0.73	0.73	0.81	0.73	0.84
	信噪比	7.68	9.43	17.39	14.52	29.66	15.9	28.5
	总体代表性	0.89	0.96	0.95	0.94	0.97	0.95	0.97
	第一主成分解释方差量(%)	38.59	42.04	50.25	54.18	61.44	53.61	60.81

a) 样本对理论序列的代表性为 85%时的最早年份和复本量

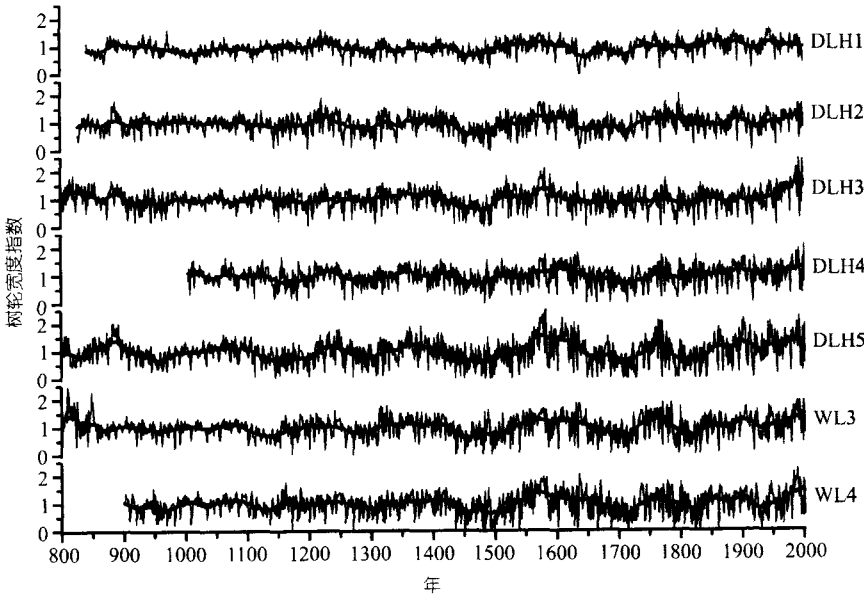


图 1 德令哈和乌兰样点的 7 条树轮宽度序列
细线为年值, 平滑曲线为 31 a 滑动平均值

及低频变化。尽管序列间最远距离为 137 km, 但在低频变化, 特别是高频变化上均有很好的 consistency, 这一点在表 5 列出的 7 条序列间相关系数得到更量化的证实。这说明树轮宽度变化所记录的是区域气候变化信息。

表 5 树轮宽度指数序列间的相关分析(1005~2001 年)^{a)}

	DLH1	DLH2	DLH3	DLH4	DLH5	WL3	WL4
DLH1	1.00	0.919	0.855	0.734	0.797	0.735	0.696
DLH2	0.827	1.00	0.887	0.785	0.853	0.790	0.749
DLH3	0.679	0.783	1.00	0.784	0.852	0.753	0.733
DLH4	0.621	0.734	0.724	1.00	0.873	0.759	0.773
DLH5	0.686	0.787	0.771	0.837	1.00	0.788	0.776
WL3	0.610	0.727	0.689	0.728	0.792	1.00	0.895
WL4	0.598	0.716	0.691	0.733	0.776	0.890	1.00

a) 左下角为年际间的相关系数, 右上角为一阶差后序列间的相关系数

2.2 树木径向生长对气候要素的响应

图 2 的左半部展示了德令哈气象站 7 种气候要素与 DLH5 样点树轮宽度之间的相关分析结果。可以看出, 5、6 月平均相对湿度与轮宽相关最高, 其次是 5、6 月的蒸发量和降水量。此外, 6 月的平均最高气温和平均气温与轮宽呈负相关关系。这些结果指示了 5、6 月水分条件对树木生长的限制作用。而这时的水分多少受降水输入和土壤水分蒸发以及树木蒸腾输出所制约。其他样点的树轮宽度与德令哈站 7 种气候要素间的相关分析结果与上述结果基本相同, 不再赘述。值得一提的是在近 20 多年(1981~2001 年)WL3 和 WL4 样点的树轮宽度与乌兰气象站点的 7 种气候要素之间相关分析中发现, 树轮宽度与 6 月月平均最高

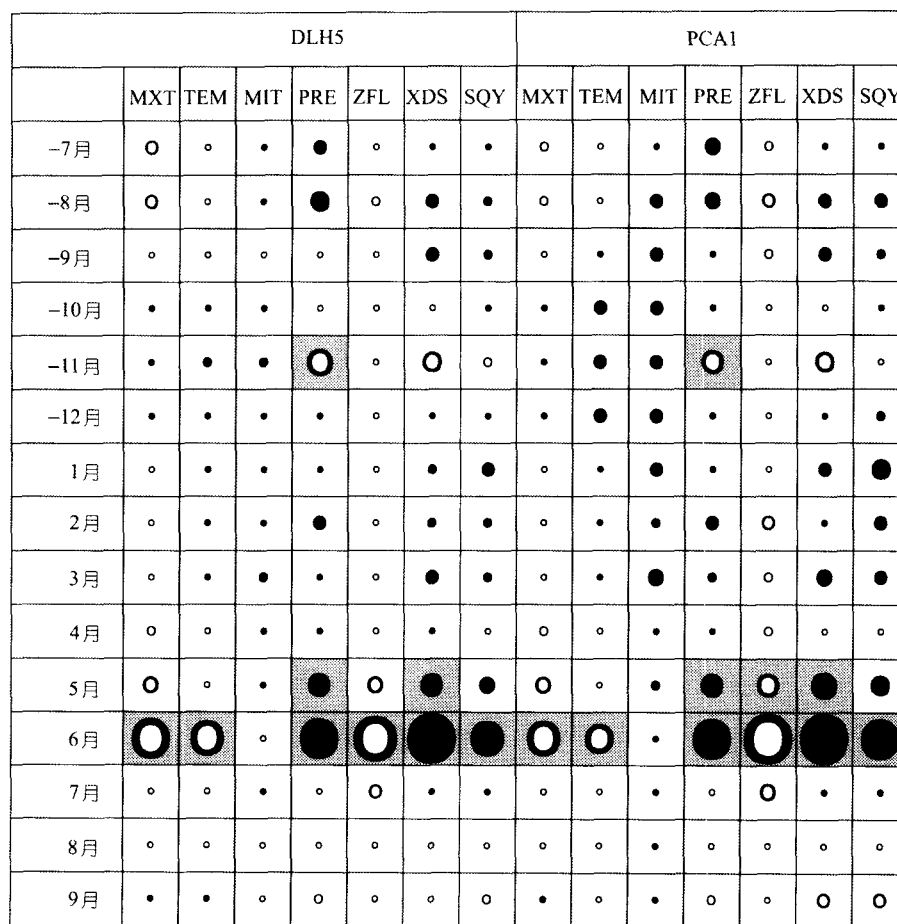


图 2 DLH5 样点和 7 条轮宽序列的第一主成分与德令哈气象站 7 种气候要素的相关分析结果

实心圆代表正相关系数, 空心圆代表负相关系数, 灰色框表示超过 99% 的置信区间, 最小圆 ≤ 0.2 , 最大圆 ≥ 0.7 , 间隔 0.05. MXT 示月均最高气温; TEM 示月均气温; MIT 示月均最低气温; PRE 示月降水量; ZFL 示月蒸发量; XDS 示月均相对湿度; SQY 示月均水汽压

气温之间相关最大. 检查德令哈 5 个样点和德令哈气象站 7 种气候要素之间 1981~2001 年的相关系数发现, 除 DLH1 样点外, 其他样点得出与乌兰样点相同的结果, 而在 DLH1 样点轮宽与 6 月降水量的相关系数比 6 月最高气温的仅高出 0.013, 这说明全球变暖后, 由于降水增加的幅度没有温度的大, 造成干旱程度增加, 导致树轮宽度在变窄. 单年分析的结果指出(图略), 窄轮出现时(1957, 1979, 1995, 1998 和 1966 年)所对应的是 5、6 月降水量少和温度高, 而宽轮出现时(1993, 1989, 1983, 1988 年)所对应的是 5、6 月降水量多和温度低. 这种结果与前面的相关分析结果是一致的.

图 2 的右半部展示了所提取的第一主成分与德令哈气象站 7 种气候要素之间的相关分析结果, 将其与图 2 左半部相比, 基本相同, 说明第一主成分的确代表了样点的气候变化信息.

2.3 重建千年年降水量变化

图 3 是利用 7 条轮宽指数序列所提取的第一主成分重建的德令哈站上一年 7 月至当年 6 月的年降水量与实测的年降水量比较图. 可以看出, 两者之间有很好的线性关系, 重建方程的方差解释量达 63.1%, F 检验值为 73.55, 交叉验证中一阶差和原序列的符号检验均通过了 99% 的置信区间, 误差缩减值^[16]为 0.59, 相关系数为 0.77. 这些统计量说明重建方程稳定, 可以用来重建过去的降水量变化.

图 4 的下部展示了重建的千年年降水量年际变化和 31 年滑动平均的低频变化. 如果以 1961~1990 年的平均年降水量 156 mm 为基准, 过去千年年降水量的低频变化以降水量偏少为主要特征, 仅 1563~1590 年和 1974~2001 年年降水量超过基准值. 如果以重建的 1002 a 的多年年降水量均值 132 mm 为基准, 低频变化中多降水期为: 1045~1096 年, 1207~1260 年, 1318~1428 年, 1520~1633 年, 1742~1780 年, 1840~1915 年和 1933~2001 年, 其中降水最多时的 1565~1595 年其年降水量可接近 200 mm; 少降水期为: 1097~1206 年, 1261~1317 年, 1429~1519 年, 1634~1741 年, 1781~1839 年和 1916~1932 年, 其中最少的 2 个时段 1465~1495 年和 1700~1720 年年降水量仅为

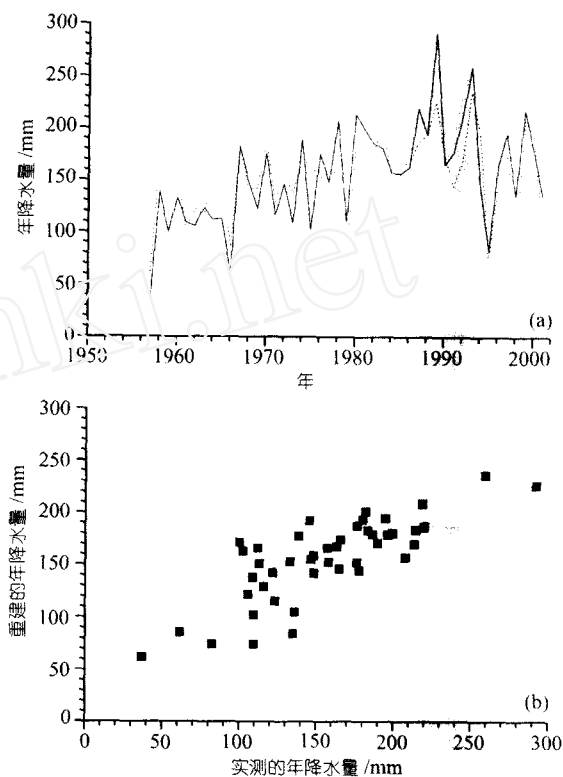


图 3 重建的与实测的上一年 7 月至当年 6 月年降水量比较
(a) 时间序列图 实线为实测值, 点线为重建值; (b) 散点图

95 mm. 从 31 年滑动平均序列看, 1430 年以前年降水量的变化幅度在正负 15 mm 左右; 但在 1430~1850 年间变化幅度上升到 30 mm 左右; 1850 年之后, 波动幅度有所减少, 并且高值的振幅大于前面低值的振幅. 20 世纪 90 年代以来, 与温度进一步升高的趋势相反, 降水开始有下降趋势.

3 讨论

早期树轮工作^[10,11]认为该区祁连圆柏生长主要反映温度变化, 但本研究却发现树木生长主要受湿度或降水影响. 根据青藏高原东北部祁连圆柏的分布及生长状况的调查, 祁连圆柏最适生长区的年降雨量为 400~600 mm 之间^[14], 而柴达木盆地东部不足 200 mm 的年降雨量已使祁连圆柏不能在盆地内生长, 只能长在山体的最大降水带上^[13]. 因此, 降水的分布决定了祁连圆柏生长的分布带. 在德令哈地区, 祁连圆柏的形成层 5 月末开始活动, 但到 6 月初时才开始

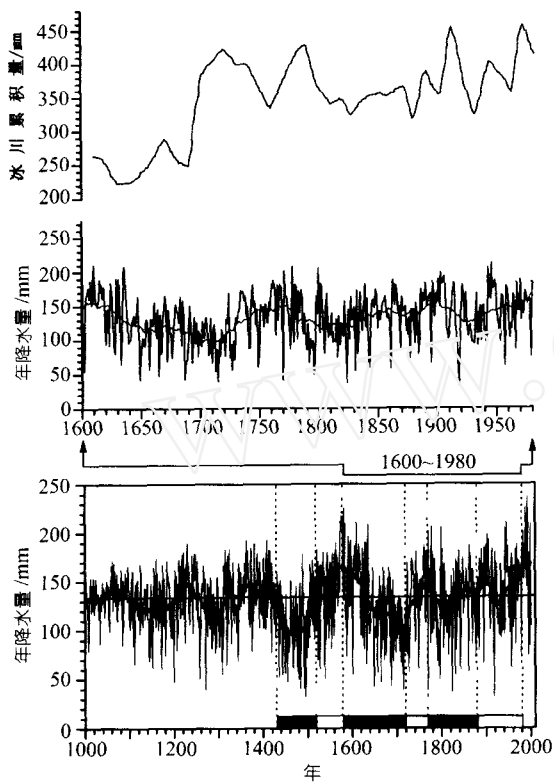


图4 重建的德令哈地区7~6月年降水量近千年的变化(下图曲线)及与冰川累积量(上图)和冰芯微粒含量(下面柱状图)比较

平滑曲线为31 a滑动平均, 直线为1002 a平均值, 灰色柱指示微粒增加期, 白色柱指示微粒减少期

形成早材细胞, 并且, 在6月底7月初时, 大部分早材可能已经形成, 在这个生长最活跃的时段, 在保证热量条件的前提下, 水分成了祁连圆柏生长的必要条件。虽然, 6月比5月的降水量已有所增加, 并与7月持平, 但旺盛的生长和干旱区较大的蒸腾、蒸发作用, 使得土壤水分条件往往不能满足祁连圆柏的生理要求, 这样生长季内5、6月份的降水对树木生长就起了主要的限制作用, 造成两者之间的显著相关关系。在极端的干旱年份, 祁连圆柏的形成层活动受到抑制, 并导致缺失轮的发生。德令哈地区祁连圆柏年轮序列中高比率缺失轮的存在也证明了水分对祁连圆柏生长的强烈的限制作用。

此外, 生长季前的冬半年最低气温与树木生长的关系虽然为正相关, 但偏相关分析发现, 固定了5、

6月降水或湿度的影响后, 冬季温度对下一年树木生长没有显著影响, 但反过来固定了冬季温度的影响后, 5、6月降水或湿度与树轮宽度的相关系数还是能达到很显著程度。此外, 分析气候要素之间的相关关系发现冬季温度和5、6月降水之间相关系数为0.458, 两者之间的这种正相关关系可能导致了冬季温度与轮宽之间相关关系。树轮宽度与6月的平均最高气温的负相关关系, 进一步说明了水分对树木径向生长的限制作用。

姚檀栋等^[28]曾对比过祁连山敦德冰芯氧同位素18含量和早期树轮宽度数据^[11], 发现虽然在低频变化上, 两者有较好的关系, 但在高频上, 两者之间在小冰期的3次冷期和3次暖期时对应关系并不完全吻合, 尽管3次冷期在树轮记录中也有明显反映, 但其起止时间与冰芯记录的略有出入, 十分突出的差异发生在20世纪, 树轮没有反映升温现象, 而冰芯和仪器记录的气候资料均有升温现象。本研究发现, 该区树轮宽度变化主要反映降水或湿度变化, 正说明了树轮宽度反映不出20世纪升温的原因。此外, 近期在祁连山中部的研究^[29]发现, 生长在森林上线的祁连圆柏的径向生长主要反映温度变化, 其与敦德冰芯氧同位素18的含量有很好对应关系。对比祁连山中部和柴达木东缘山地的树轮资料发现, 虽然在某些时段, 两者有一定的相似, 但总体来看存在较大的差异。在千年尺度上, 它们的年际相关系数为0.254, 31年滑动平均后, 相关系数仅0.32, 去除自相关系数造成的自由度损失后, 显著程度较低, 说明两者反映的环境要素不同。

从前面的重建结果中可以看到, 校准期(1956~2001年)正处于千年尺度中降水量较多时期, 并且在这段时期内树轮资料仅包括了树轮最宽年(1993年)而没有包括最窄年(1918年), 严格的讲, 这会影响到均一性原理, 即“将今论古”在本文的有效应用。考虑到降水量少时水分对树木生长的限制作用更强, 本文对少雨期的干旱程度的估计可能有些偏低, 也就是说在干旱时期实际的降水量可能比重建的还要少, 但对重建序列反映的低频变化趋势影响不大。

为了检验利用现行的降水量和树轮宽度序列之间关系方程对过去降水量进行重建时的有效性, 将

本文重建的年降水量变化与用来反映降水变化的敦德冰芯 AD 1600 年以来的冰川累积量^[30]进行了对比(图4上部),发现在低频变化上,有一定的一致性,特别是 1730 年以来对应很好. 17 世纪时冰川累积量以上升趋势为主,而树轮重建的降水量以下降趋势为主,但从 11 年滑动平均的变化看两者的波动过程还是有对应关系. 冰芯资料取自 20 世纪 80 年代末,并且分辨率比树轮的低一些可能是引起两者差异的主要原因. 另一原因可能是冰芯和树轮反映的是不同垂直高度的降水变化. 冰芯中微粒的含量与其周围地区植被覆盖状况有关,气候干燥时,土壤湿度小,下垫面植被覆盖度小,易起沙,造成冰芯中微粒多;而气候湿润时,土壤湿度大,下垫面植被覆盖度大,就不易起沙,冰芯中微粒含量也就较少,因此冰芯中微粒的含量变化能间接地反映气候的干湿变化. 将本文重建的年降水量变化与敦德冰芯 AD 1400 年以来的微粒含量^[31]进行了对比,发现两者之间有很好的反位相对应关系(图 4),即冰芯中微粒含量低时,对应降水量多,特别是 3 次主要微粒增加时期(1430~1520 年, 1580~1710 年, 和 1770~1880 年)均对应明显的降水量少期. 此外,将本文所重建年降水量与半干旱区的青海湖湖芯沉积物中的碳酸盐含量^[32]进行了对比(图略)发现,两者在一定程度上存在反相关关系,由于湖芯中碳酸盐含量的环境指示意义比较复杂^[1],这里不再进一步论述. 由于树轮资料的高精度定年和大复本量的应用,从树轮与冰芯在近几百年所反映的相同变化可以推论,本文所重建的年降水量变化是比较可靠的.

为了了解重建的德令哈年降水量在空间的代表性,计算了德令哈站点的和其他站点以及网格点资料在同时段的年降水量的相关系数(表 6),可以看出,除了与东边 400 km 以外日月山以东的西宁相关很小外,在同一自然区域内,变化一致性比较好,说明

德令哈站点的降水量对其所在区域的有一定的代表性.

4 结论

本文基于在德令哈和乌兰所建立的 7 条大复本量千年长度的树轮宽度指数序列重建了德令哈过去千年的年降水量变化,得到下列结论:

(1) 在研究区所建立的 7 条千年长度的祁连圆柏轮宽指数序列有明显的年际间变化及较强的公共信号,说明它们是研究气候变化的很好的代用资料.

(2) 树轮宽度指数序列对气候要素的响应分析发现,轮宽与 5, 6 月降水量呈正相关,而与 6 月最高气温呈负相关,但 6 月的相对湿度与树轮宽度之间的相关系数最大. 由于 6 月的高温会增加土壤水分的蒸发,并加强树木的蒸腾作用,上述结果说明研究区祁连圆柏的径向生长主要受水分条件的控制.

(3) 利用回归分析在德令哈上一年 7 月至当年 6 月的年降水量和由 7 条轮宽序列所提取的第一主成分之间建立了转换函数,重建方程的方差解释量高达 63.1%,通过交叉验证,说明方程稳定,可用于重建. 而上一年 7 月至当年 6 月的年降水量与一般意义上 1~12 月年降水量的相关分析表明,本文所重建的年降水量变化可以相当于一般意义上的年降水量变化.

(4) 利用转换函数重建了德令哈上一年 7 月至当年 6 月的千年长度的年降水量,如果以 1961~1990 年年降水量的均值为基准,过去的千年降水量的低频变化以降水量偏少为主要特征,仅 1563~1590 年和 1974~2001 年降水量超过基准值. 如果以重建的 1002 年的多年均值为基准,多降水期主要为 1520~1633 年和 1933~2001 年,少降水期主要为 1429~1519 年和 1634~1741 年. 此外,1430 年之前年降水量的变化幅度较小,但在 1430~1850 年间变化幅度增大,1850 年

表 6 站点间年降水量的相关分析

	都兰	乌兰	香日德	诺木洪	格尔木	大柴旦	茶卡	西宁
德令哈	0.711	0.802	0.751	0.656	0.491	0.503	0.380	0.019
格点 (37.25°N, 97.25°E)	0.701	0.765	0.774	0.703	0.551	0.493	0.309	0.147

1) 王苏民, 个人商榷

之后变化幅度有所下降, 并且高值的振幅大于前面低值的振幅. 20世纪90年代以来, 与温度进一步升高的趋势相反, 降水有下降趋势.

(5) 与敦德冰川累积量和微粒含量对比发现, 近几百年内, 三者在低频变化上有较好的一致性, 由于树轮资料定年的准确度高, 可以说本文所重建的降水量变化是比较可靠的, 并在区域上有一定的代表性.

致谢 作者对青海海西州林业部门的大力支持表示感谢, 李田育、王君波、何吉成、刘录三、朱海峰参加野外取样.

参 考 文 献

- Eddy J A. Past Global Changes Project: Proposed Implementation Plans for Research Activities. Global Change Report No. 19. Sweden, Stockholm: IGBP, 1992. 1~112
- Oldfield F. Past Global Changes (PAGES): Status Report and Implementation Plan, Global Change Report, No.45 Sweden, Stockholm IGBP, 1998.1~112
- Duplessy J C, Overpeck J. The PAGES/CLIVAR Intersection. Providing the paleoclimatic perspective needed to understand climate variability and predictability. Switzerland, Bern: PAGES Core Project Office, 1994
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperature during the last millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geography Research Letter*, 1999, 26: 759~762
- 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
- Briffa K R. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Review*, 2000, 19: 87~105
- Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 2001, 292: 662~667
- 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
- Stahle D W, D'Arrigo R D, Krusic P J, et al. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2137~2152
- 康兴成, Graumlich L J, Sheppard P R. 青海都兰地区 1835a 年轮序列的建立和初步分析. *科学通报*, 1997, 42(10): 70~75
- 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退的关系. *科学通报*, 1982, 27(21): 1316~1319
- 郑 度. 青藏高原自然地域系统研究. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 336~341
- 杜 庆, 孙世洲. 柴达木盆地地区植被及其利用. 北京: 科学出版社, 1990
- 《青海森林》编委会. 青海森林. 北京: 中国林业出版社, 1993
- 邵雪梅, 方修琦, 刘洪滨, 等. 柴达木盆地东缘山地千年祁连山圆柏年轮定年分析. *地理学报*, 2003, 58(1): 90~100
- Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. New York: Academic Press, 1976
- Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago: the University of Chicago Press, 1968
- Holmes R L. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69~78.
- Cook E R, Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, 41: 45~53
- New M, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth-century space-time climate variability. II. Development of 1901~1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, 2000, 13: 2217~2238
- Johnson R A, Wichern D W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. New Jersey: Prentice-hall, 1982
- Kienast F, Schweingruber F H, Bräker O U, et al. Tree ring studies on conifer along ecological gradients and the potential of single-year analysis. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1987, 17: 683~696
- Draper N R, Smith H. *Applied Regression Analysis*. New York: John Wiley and Sons, 1981
- 刘 禹, 马利民. 树轮宽度对近 376 年呼和浩特季节降水的重建. *科学通报*, 1999, 44(18): 1986~1992
- 刘 禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 树轮降水记录及东亚夏季季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例. *地学前缘*, 2001, 8(1): 91~97
- Wigley T M L, 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
- 康兴成, 程国栋, 康尔泗, 等. 利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(8): 675~685
- 姚檀栋, 谢自楚, 武筱舸, 等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. *中国科学, B 辑*, 1991, (11): 1196~1201
- 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*, 2004, 34(1): 89~95
- Yao T D, Xie Z C, Yang Q Z. Temperature and precipitation fluctuations since 1600a provided by Dunde Ice Cap, China. Presented in International Symposium on Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions. Moscow: IAHS publ 208, 1991. 61~70
- 刘纯平, 姚檀栋, Thompson L G, 等. 敦德冰芯中的微粒含量与沙尘暴及气候的关系. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 9~14
- 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(6): 508~513