www.scichina.com

earth.scichina.com

论文

祁连山中部近 500 年来降水重建序列分析

田沁花⁰⁰³,周秀骥^{0*},勾晓华²,赵平⁴,范泽鑫⁶,Samuli HELAMA⁶

① 国家气候中心,北京 100081;

② 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

③ 中国气象科学研究院, 北京 100081;

④ 国家气象信息中心,北京100081;

⑤ 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 昆明 650223;

6 Arctic Centre, University of Lapland, 96101 Rovaniemi, Finland

* 联系人, E-mail: xjzhou@cams.cma.gov.cn

收稿日期: 2011-08-05; 接受日期: 2011-10-29

国家自然科学基金(批准号: 41001058, 41001009, 40971119)、中国博士后特别资助(编号: 201003194)和国家自然科学基金重大项目(批准号: 40890052)资助

摘要 利用祁连山中部地区祁连圆柏(Juniperus przewalskii)年轮宽度资料,重建了该地区 公元 1480年以来上年 8 月至当年 7 月的年降水量.重建显示过去 5 个世纪大致可分为 4 次 主要的干、湿期: 16 世纪偏湿, 17 世纪干旱, 18~20 世纪初偏湿, 20 世纪偏干(20~30 年代极端 干旱).采用经验模态分解(EMD)方法对重建序列的进一步分析显示,重建降水序列可分解 为高频至低频 8 个尺度的分量,各分量在不同时段周期和振幅的变化过程与原序列降水的 高低值时期对应较为一致,趋势项显示了过去 5 个世纪研究区降水量呈平缓上升的总体趋 势.其中 2~3 和 5~8 年的主要分量揭示了降水量与 ENSO 等大气环流和海气耦合相联系的 变化特征, 10~13 年尺度的分量显示了区域降水与太阳活动的可能联系.结合已有研究的集 成分析揭示了研究区更为可靠、一致的干湿变化记录,显示了过去 5 个世纪以来干旱事件 频繁持续的特征和 19~20 世纪高降雨记录增多的趋势,区域降水经历着较大变化,但其变 化幅度仍不可预知.该重建提供了更多的低频降水信息,是对研究区已有树轮重建降水量 信息的重要补充.

祁连山地处亚欧大陆腹地, 绵延于青藏高原东 北缘. 该地区同时受东亚季风、中高纬西风环流和青 藏高原的共同影响, 生态环境脆弱. 自 20 世纪 50 年 代起, 在全球变化的影响下, 祁连山区的气候发生了 重要变化, 冰川退缩和雪线上升极为明显, 引起了河 西水资源的危机. 在该区域从事气候变化研究具有 重要的社会和科学意义. 高原地区有限的站点和较

短的观测资料,极大地限制了长时间尺度上气候变化的研究,而高分辨率的树轮资料是解决这一问题的有效手段.

《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

关键词

祁连山

树轮宽度

降水多尺度变化

经验模态分解

目前,青藏高原已开展了一系列的树轮气候学研究,在长尺度气候重建中获得了不少成果^[1-8].20世纪70年代,在祁连山发现近千年的活树^[9],即展现了在该区进行树木年轮气候学研究的潜力.近年来,

英文引用格式: Tian Q H, Zhou X J, Gou X H, et al. Analysis of reconstructed annual precipitation from tree-rings for the past 500 years in the middle Qilian Mountains. Sci China Earth Sci, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4375-6

利用树轮宽度对祁连山区过去百年至千年尺度温度 变化^[10-12]和黑河流域径流量^[13-15]进行重建与分析取 得了较快进展,同时在祁连山森林上限也开展了树 木-气候生长型和树木生长对气温响应分异的研究^[16]; 利用树轮宽度和早晚材密度等多种资料分别重建了 祁连山地区过去 2~3 个世纪降水变化^[17-22]; Yang 等^[23] 在祁连山西部地区建立了过去 600 年的降水序列, Zhang等^[24,25]建立了祁连山中部地区近千年来的降水 序列,但对已有序列所反映的局地差异和区域性特 征有待进一步的考证,树轮长年表仍需补充和验证; 另一方面,已有研究中对重建序列多尺度自然变化 特征的分析和研究也十分有限.

本研究在祁连山中部地区新建立了一条 521 年 的树轮宽度长年表,且基于本文的降水量重建序列, 结合已有研究进行了初步的集成分析,对区域降水 变化一致性特征有了新的认识;同时,利用经验模态 分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[26,27]方法 对本文的重建序列进行多尺度变化特征提取,揭示了 祁连山地区降水量变化包含的 8 个尺度的自然振荡, 研究了各分量的时间变化过程及反映的不同尺度降 水量变化信息,分析了各分量的主周期及相联系的 可能驱动因子,对气候序列中叠加的各种尺度信号 所对应的物理意义和变化规律有了更全面的认识.

1 树轮气候重建及特征分析

研究区位于祁连山中部,属高寒干旱半干旱区 及东部湿润区的过渡区,树木生长对气候变化响应 敏感.海拔 2600~3500 m 处,祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)保存较好,为在该区域获取较长的树轮 序列提供了重要条件.研究区年总降水量在 200~500 mm 之间且随时空呈不均衡分布,从东到西降水量逐 渐减少,冬季寒冷干燥、降水稀少,夏季 5~8 月降水丰 ^{沛[28]};海拔 2000~3000 m 之间年平均温度在 0~5℃, 空间分布形势比较稳定,年际变化较小^[29].4000 m 以 上终年积雪,发育现代冰川.

2000 年 9 月, 在祁连山中部(38.78°N, 99.73°E) 采集活树样本 32 棵, 共 65 株样芯, 采样高度为 2900~3150 m. 采样点位于甘肃省肃南县青龙乡孔岗 木林场, 标记为 KGM2, 距离采样点最近的气象站为 肃南站(图 1).

所有取得样芯经过固定、打磨和交叉定年,然后 在精度为 0.001 mm 的测量仪(Velmax)上测量逐轮宽 度,并利用 COFECHA 程序进行定年质量控制和校 准^[30],主序列长度为 628 年(1373~2000).进一步用 ARSTAN 程序^[31]对所有样本宽度序列进行负指数函 数或线性拟合并去除生长趋势,其中,对个别受非气



HYG 为本文用以对比分析的 Zhang 等^[24,25]样点



图 2 本文建立树轮 STD 年表、样本量、EPS 变化曲线及邻近点 Zhang 等^[24,25]STD 年表对比

候因素干扰较明显的受压木宽度序列进行样条函数 拟合,最终得到标准化(STD)、差值(RES)和自回归标 准化(ARS)等 3 种年表.为了保留尽可能多的低频信 息,本文采用 STD 年表进行分析(图 2),还给出了邻 近点 Zhang 等^[24,25]已发表的曲线,二者在高频上表现 了较好的一致性.

表 1 给出了 KGM2 树轮宽度序列的统计特征. 基于树轮研究的复本原理^[32],树轮宽度年表的可靠 长度以子样本信号强度(Subsample Signal Strength, SSS)来确定^[33].本研究取 SSS 门限为 0.8,结合 RBAR 值^[34],可靠年表的起始年代定为 1480 年.起始年为 1491 年时, SSS 值达到 0.85,年表可靠度有所提高.

表1 祁连山地区圆柏树轮宽度序列基本统计量

统计量	KGM2
平均敏感度(MS)	0.26
一阶自相关(AC1)	0.45
序列平均相关(R1)	0.34
平均树间相关(R ₂)	0.33
平均树内相关(R ₃)	0.70
信噪比(S/N)	23.69
样本总体代表性(EPS)	0.96
第一主成分方差解释量(PC1)	38.65%
序列长度	1373~2000年
SSS>0.80(8 芯/4 树)	1468~2000 年
SSS>0.85(9 芯/5 树)	1491~2000 年

为了分析树轮年表所反映的主要气候信息,本 文采用距离样点最近的肃南气象站(图 1)的观测资料 对树轮宽度资料指示的气候意义进行相关分析,肃 南站 1957~2000 年间多年月平均温度和降水量变化 特征如图 3. 图 3 显示肃南站雨热同期,7 月平均气温 最高(16.28℃),降水量也达最高(60.97 mm);多年月 平均气温为 3.79℃,年总降水量为 254 mm.



肃南站上年7月至当年8月共14个月的逐月气 象数据分别被用来与树轮宽度年表进行相关分析. 图4分析表明,研究点树轮宽度年表与当年生长季月 均气温大致呈负相关,与前一年冬季9~12月和当年 1,3和4月气温呈弱的正相关;而与前年7~9月及当 年大部分月份(1~8月)降水量呈正相关关系,且相关 系数远高于其与月平均气温的相关值.

可以看出,降水是该区域树木生长的主要限制 因子,这与干旱-半干旱地区树木生长与气候响应的 模式比较吻合,即在一定的变化幅度内,降水增多有 利于宽轮形成,是树木生长的主要影响因子,与年轮 指数呈正相关关系;而生长季温度过高会增加蒸发, 间接降低土壤有效湿度导致树木生长水分亏缺,易 形成窄轮,因此,温度是影响树木生长的间接因子, 与年轮指数呈反相关(图 4).



图 4 树轮年表与肃南气象站观测资料相关系数(1957~2000)

结合树轮年表与降水量的高相关月份,进一步 分析季节的降水量与树轮指数间的相关关系.结果 表明,前一年 8 月至当年 7 月的总降水量与 STD 年 表相关最高,达到了 0.613(p<0.001),树木生长对降 水量响应敏感,满足气候重建的要求.

在相关分析的基础上,我们以当年的标准化 STD年表为预报因子,前一年8月至当年7月总降水 量为预报量,建立了转换函数:

 $P_{(P8-7)} = 95.764 + 173.253 \times \text{STD},$

其中 P(P8-7)代表上年 8 月至当年 7 月总降水量.

我们选用传统的逐一剔除法对重建方程进行稳定性和可靠性检验,各统计结果见表 2. 相关系数 r=0.613(P<0.001),方差解释量为 37.6%,符号检验值 S₁和一阶差符号检验值 S₂同号数均达到了 99%的置信度,说明重建序列同实测序列在高频和低频变化上均比较吻合,乘积平均值 t 为 3.51,超过了 99%的置信度临界值(2.70),具有有效诊断能力的残差缩减值 RE 为 0.33,各统计量均表明重建方程稳定、可靠,可以被用来重建研究区过去 5 个世纪的降水量变化.

表 2 重建方程的统计量

r	r^2	F	S_1 S_2		t	RE
0.613	0.376	25.31	32(31 ^{a)} , 28 ^{b)})	33(31 ^{a)} , 28 ^{b)})	3.51	0.33

a) 超过 99%的置信度所需同号数; b) 超过 95%的置信度所需 同号数 通过对观测时段内(1957~2000年)肃南站降水量 实测值与重建值的比较(图 5),可以看出实测值与重 建值的变化趋势基本一致.在个别时段,二者的数值 极为接近,进一步表明我们的回归模型是可靠的,可 以用来重建祁连山中部地区过去 521 年以来的降水 序列.图 6 为重建的公元 1480~2000 年上年 8 月至当 年 7 月的降水量序列及 11 年滑动平均曲线.

重建时段的平均值为 261.28 mm,标准差 σ 为 46.65 mm. 在过去 521 年,滑动序列低于平均值的时期 有 1485~1511, 1587~1607, 1619~1701, 1709~1718, 1785~ 1800, 1819~1831, 1878~1886, 1922~1942, 1948~1976 和 1990~1995 年; 滑动序列高于平均值的时期有 1512~ 1586, 1608~1618, 1719~1784, 1801~1818, 1832~1877, 1887~1921, 1943~1947 和 1977~1989 年.



图 5 祁连山中部上年 8 月至当年 7 月年降水量重建值和观测值对比



图 6 1480~2000 年上年 8 月至当年 7 月年总降水量重建序列及 11 年滑动平均曲线

11 年滑动平均序列可以更好地显示重建序列的 低频变化特征(图6). 与均值相比, 过去521年降水量 变化总体上可分为4次主要的干、湿期:16世纪前半 叶偏湿期(1500~1550), 17世纪偏干期(1600~1710), 18 世纪初至20世纪偏湿期(1720~1920)和20世纪20~30 年代的极端干旱期(1928年出现近 500年来的降水最 低值). 其中, 滑动序列高于均值 1σ(307.93)的显著 丰水期为1728~1743,1808~1812和1896~1907年;而 低于均值 1o(214.63)的显著干旱期为 1670~1685 和 1928~1933年.20世纪20~30年代被较多研究证实在中 国大区域背景上发生了一次极端干旱事件[35,36].本研 究与 Zhang 等^[25]重建序列在公共时段内年际尺度上有 较高的相关,相关系数达 0.627(n=521),且两序列的 特征年极为吻合, 表明两序列在高频变化上具有较 好的一致性, 差异表现为本研究中 17 世纪的干旱特 征更为显著.

2 重建降水序列的多尺度变化分析

经验模态分解(EMD)是 1998 年 Huang 等^[26]提出 的实现对一个长序列多尺度变化特征全面分析和理解 的新方法,其优点是可以使不同尺度的信号分量得以 保留和提取,帮助我们更好地认识目标序列的多尺度 变化特征和总体趋势,已被应用于信号处理、图像处 理和大气科学等领域^[37-39].为了实现对研究区过去 5 个世纪降水量多尺度变化特征的全面认识,下文将利 用 EMD 方法对重建序列进行深入分析,为认识和理 解该地区的干湿变化规律提供更科学的信息和依据.

EMD 本质上是按照信号的自然振荡将不同尺度 (频率)的波动或趋势逐级从原信号中分解出来,得到 一系列具有不同尺度的本征模函数 IMF(Intrinsic Mode Function)分量,且所有模态分量之和可还原为 原始变量序列.不同层次的 IMF 分量都可能对应于 某一物理背景,最低频率的分量(剩余项, residue)代 表原始信号的趋势项,趋势项表示的是信号中存在 的线性项或缓慢变化的、周期大于信号资料长度的 成分.

利用 EMD 运算程序, 对本研究中公元 1480~2000 年(521 年)的重建降水序列进行分解, 得到 8 个本征 模函数分量(图 7), 每个 IMF 分量对应于一个窄波段 的降水波动, 反映该尺度降水量的周期和振幅随时 间的变化过程.

图 7 中每个 IMF 分量的变化规律均符合自然信号的非线性变化特点, 波动具有相对稳定的准周期, 我们称为主周期. 但各尺度信号对原始数据总体特征的影响程度有很大差异, 其中各分量振幅的平方可反映该分量在原数据中的信号强度和能量大小, 相关系数同时反映各分量对原序列变化特征的影响 程度(表 3).

其中, IMF1 和 IMF4 与原序列相关高、振幅大, 是反映重建序列变化特征的主要成分;其次为 IMF2 和 IMF3,而 IMF5 和 IMF6 与原序列的相关低于 0.3, 同时 IMF6 周期性波动较不稳定; IMF7 分量及趋势项 IMF8 与原始序列的相关系数显著下降,且振幅减小, 一定程度上反映了重建序列存在的世纪尺度波动特 征,但波动较小,信号较弱.下文将根据各分量随时 间的周期和振幅变化讨论研究区降水量不同尺度的 主要变化特征.

3 重建序列不同尺度主要变化特征讨论

EMD 分析使细节化的局部特征更加清楚. 如图 7



图 7 重建降水序列的 EMD 分解各分量

表3 IMF 分量的主要统计值

IMF 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8
主周期	2~3	5~8	10~13	29	50~64	-	-	-
最大振幅	110	60	45	45	30	60	25	_
相关系数	0.52	0.34	0.35	0.43	0.27	0.29	0.16	0.07

所示,各分量分别显示了降水序列不同尺度上主周 期和振幅在时间域中的分布及变化情况.

IMF1(图 7(a))主周期为 2~3 年,随时间变化周期 比较一致,是原序列中信号最强的分量,反映了重建 序列的主要高频振荡,该振荡可能主要受 QBO(准 2 年振荡)以及 QTO(准 3 年振荡)影响所致,即受赤道 地区平流层的 26~30 个月为周期的东向风和西向风 之间的不断转换形成的准 2 年及准 3 年振荡^[40,41],该 序列的最大振幅出现在 18 世纪 20 年代,与重建时段 的丰雨期相对应,而 20 世纪 20 年代附近的最小振幅 对应于极端干旱. IMF2(图 7(b))代表主周期为 5~8 年 的波动,可能主要与 ENSO 海气耦合周期相联系^[42].

IMF3(图 7(c))显示了 10~13 年尺度的变化,该周期与太阳活动 11 年周期^[43]非常相近,可能表明了两者之间的关系;但随时间变化,该尺度周期和振幅发

生了多次跳跃, 在重建时段 17 世纪偏干期(1620~ 1710年)振幅和信号强度迅速减弱; 而在19世纪初期 和 20 世纪初期(偏湿期)分别出现一次振幅和频率的 突变, 周期跳跃为 27 年左右, 但 19 世纪突变之后振 幅迅速减弱, 而 20 世纪振幅较大. IMF4(图 7(d))主要 代表降水量 29 年左右的年代际振荡, 周期和振幅变 化幅度较小.

IMF5(图 7(e))表现为 50~64 年尺度的相对平稳振 荡, 仅序列两端出现振幅的较大波动. IMF6(图 7(f))揭 示了降水量可能存在的世纪尺度不稳定振荡. 值得注 意的是, 三次波峰分别对应于重建序列的高降水期: 16 世纪 40 年代, 18 世纪 40 年代和 20 世纪第一个 10 年, 最强的波谷 17 世纪 80 年代则对应于重建序列偏 干期极值年份; 19 世纪之后该尺度振荡明显减弱. IMF7(图 7(g))为重建期内的一波振荡, 波峰与重建偏 湿期(18世纪初至20世纪初)中期对应较好,反映了 近500年祁连山地区存在干-湿-干的低频变化,但该 分量与原数据的相关显著降低,且振幅微弱,说明原 序列世纪际尺度的信号很弱.

IMF8(剩余分量, Residue)为本文重建序列从高频到低频分离的剩余项, 波动幅度在10 mm 左右, 该分量反映了过去 521 年来该降水序列缓慢上升的总体变化趋势, 且公元 1480~2000 年, 降水量的变化大致为 10 mm(图 7(h)). 但需要说明的是, 由于 EMD 分解过程以信号分量极值点少于 2 为结束判据, 因此, 受数据集长度限制, 是否存在更大时间尺度的振荡分量有待进一步考证.

4 多序列权重集成分析

为了获取区域更为可靠的气候一致性信息,不 仅需要更多的重建结果,也需要对己有研究进行综 合分析.因此,我们将本研究、Zhang 等^[25]和邻近研 究点Yang 等^[23]对历史时期祁连山地区降水量干湿期 的重建结果进行了权重集成分析,以增强古气候记 录信息的可靠性(图 8).水平线(a,b和 c)分别为Yang 等^[23]和 Zhang 等^[25]及本研究中定义的干旱和多雨期, 三个重建显示的一致的干湿记录被认为是最可靠的 信息,相应年份对应于指数 3,其次两个序列的一致 期定义为指数 2,单个序列的干湿期定义为指数 1,同 样方法将多雨期分为三个等级.从图 8 可以看出,过 去 5 个世纪主要表现出了如图标注的 3 次三级干旱记录: 1486~1489, 1713~1715 和 1928~1932; 而一致的三级多雨记录则仅出现在近两个世纪, 分别为 1843~1845, 1854~1856, 1892~1894, 1896~1899, 1901~1907和 1980~1985.

集成分析更好地展示了祁连山地区的干湿变化, 显示出研究区干旱持续性发生的特征;另一方面,也 显示了19~20世纪多雨记录增多、降水增强的变化趋势,与本研究中重建降水序列多尺度变化特征显示的 降水增加趋势极为一致(图7(h)).这个结果与Qin等^[14] 对黑河流域 20世纪洪水增多的研究、施雅风等^[44]关 于中国新疆及祁连山中西段降水和径流增加趋势的 预测和马晓波等^[45]对西北地区气候变化趋势的研究 均较为吻合.并且已有研究认为 20世纪的变湿与全 球变暖^[46]关系密切.尽管对于未来气候的干湿演变 幅度仍然未知,但加强对研究区长尺度降水序列的 分析研究,无疑可以提高我们对正在经历的气候变 化的理解,也显示了对本研究区更多更长序列古气 候资料的迫切需求.

5 结论

通过祁连山中部地区与降水量较高相关,长达 521 年的祁连圆柏宽度资料,建立了一条过去 500 年尺度的降水量序列,为区域气候对比分析提供了 一条显示更多降水变化信息的新序列,也是对区域



水平线(a, b 和 c)分层显示了 Yang 等^[23]、Zhang 等^[25]和本研究中定义的干旱和多雨期;柱线代表三者一致的干湿期指数

树轮网及空间气候场长尺度降水量分析资料的重要补充.

公元1480~2000年上年8月至当年7月的降水量 重建结果显示过去521年区域降水量大致经历了4次 干湿交替.而 EMD 分析得到了重建降水序列存在的 高频至低频8个尺度的变化分量,其中2~3和5~8年 的分量揭示了降水量的主要变化特征,以及过去521 年来祁连山中部地区降水量以 ENSO 等海气环流为 主控因子的变化特征;10~13年尺度的分量指示了降 水量与太阳活动的可能联系.邻近研究点3条树轮重 建序列的权重分析揭示了研究区更为一致、可靠的干 湿分布特征,近两个世纪出现的多雨记录及降水量 增加趋势与多尺度分解的趋势项显示的过去 5 个世 纪降水量平缓上升的趋势极为吻合.

本研究是利用 EMD 分解方法对树轮重建序列多 尺度变化的初次研究,与传统分析相比较,EMD 分析 按照序列的自然振荡进行逐级分解,为我们对不同 尺度变化特征潜在动力机制的理解提供了更多信息, 在全面分析区域气候变化特征和机理方面有较大潜 力.与已有研究相比,我们的研究对气候机理进行更 好的分析解释,另外,结合已有研究的综合权重分析 为区域的干湿变化提供了更为可靠的古气候信息.

致谢 感谢张峰、朱崇抒博士和张永博士在程序调试和文章修改等方面的大力帮助;同时,非常感谢两位审稿专家 的宝贵建议.

参考文献」

- 1 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
- 2 Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Quat Sci Rev, 2010, 29: 2111–2122
- 3 刘禹, 安芷生, 马海洲, 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
- 4 刘禹, 安芷生, Han 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
- 5 Zhang Q B, Guo D C, Tan D Y, et al. A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1739–1742
- 6 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, China. Clim Dyn, 2004, 23: 869–881
- 7 勾晓华,邓洋,陈发虎,等.黄河上游过去1234年流量的树轮重建与变化特征分析.科学通报,2010,55:3236-3243
- 8 康兴成,张其花,Lisa J G,等.利用树轮资料重建青海都兰地区过去 1835 年的气候变化.冰川冻土,2000,22:65-72
- 9 王玉玺, 刘光远, 张先恭, 等. 祁连山圆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: 1316-1319
- 10 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
- 11 Liu X H, Shao X M, Zhao L J, et al. Dendroclimatic temperature record derived from tree-ring width and stable carbon isotope chronologies in the Qilian Mountains, China. Arct Antarct Alp Res, 2007, 39: 651–657
- 12 Tian Q H, Gou X H, Zhang Y, et al. May-June temperature reconstruction over the past 300 years based on tree rings on the Qilian Mountains of northeastern Tibetan. IAWA J, 2009, 30: 421–434
- 13 Liu Y, Sun J Y, Song H M, et al. Tree-ring hydrologic reconstructions for the Heihe River watershed, western China since AD 1430. Water Res, 2010, 44: 2781–2792
- 14 Qin C, Yang B, Burchardt I, et al. Intensified pluvial conditions during the twentieth century in the inland Heihe River Basin in arid northwestern China over the past millennium. Glob Planet Change, 2010, 72: 192–200
- 15 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:地球科学,2002,32:675-685
- 16 Zhang Y X, Shao X M, Wilmking M. Dynamic relationships between *Picea crassifolia* growth and climate at upper treeline in the Qinlian Mts., Northeast Tibetan Plateau, China. Dendrochronologia, 2011, 29: 185–199
- 17 Chen F, Yuan Y, Wei W. Climatic response of *Picea crassifolia* tree-ring parameters and precipitation reconstruction in the western Qilian Mountains, China. J Arid Environ, 2011, 75: 1121–1128
- 18 Tian Q H, Gou X H, Zhang Y, et al. Tree-ring based drought reconstruction (A.D. 1855–2001) for the Qilian Mountains, northwestern

China. Tree-Ring Res, 2007, 63: 27-36

- 19 勾晓华,陈发虎,王亚军,等.利用树轮宽度重建近 280 a 来祁连山东部地区的春季降水.冰川冻土, 2001, 23: 292-296
- 20 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: 373-377
- 21 Liang E Y, Shao X M, Liu X H. Annual precipitation variation inferred from tree rings since AD 1770 for the western Qilian Mts., northern Tibetan Plateau. Tree-Ring Res, 2009, 65: 95–103
- 22 Liu W H, Gou X H, Yang M X, et al. Drought reconstruction in the Qilian Mountains over the last two centuries and its implications for large-scale moisture patterns. Adv Atmos Sci, 2009, 26: 621–629
- 23 Yang B, Qin C, Bräuning A, et al. Rainfall history for the Hexi Corridor in the arid northwest China during the past 620 years derived from tree rings. Int J Climatol, 2011, 31: 1166–1176
- 24 Zhang Y, Gou X H, Chen F H, et al. A 1232 years tree-ring record of climate variability in the Qilian Mountains, northwestern China. IAWA J, 2009, 30: 407–420
- 25 Zhang Y, Tian Q H, Gou X H, et al. Annual precipitation reconstruction since A.D. 775 based on tree rings from the Qilian Mountains, northwestern China. Int J Climatol, 2011, 31: 371–381
- 26 Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc R Soc Lond A, 1998, 454A: 903–995
- 27 Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum. Ann Rev Fluid Mech, 1999, 31: 417–457
- 28 杨全生,刘建泉,汪有奎.甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告.兰州:甘肃科学技术出版社,2008
- 29 张存杰, 郭妮. 祁连山区近 40 年气候变化特征. 气象, 2002, 28: 33-39
- 30 Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree Ring Dating. Chicago: The University of Chicago Press, 1968
- 31 Cook E R. A time-series analysis approach to tree-ring standardization. Doctoral Dissertation. Tucson: University of Arizona, 1985
- 32 Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976
- 33 Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. J Clim Appl Meteorol, 1984, 23: 201–213
- 34 Briffa K R. Interpreting high-resolution proxy climate data—The example of dendroclimatology. In: von Storch H, Navarra A, eds. Analysis of Climate Variability, Applications of Statistical Techniques. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995. 77–94
- 35 Liang E Y, Liu X H, Yuan Y J, et al. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid areas of northern China. Clim Change, 2006, 79: 403–432
- 36 Li J, Chen F, Cook E R, et al. Drought reconstruction for north central China from tree rings: The value of the palmer drought severity index. Int J Climatol, 2007, 27: 903–909
- 37 Yang P C, Wang G L, Bian J C, et al. The prediction of non-stationary climate series based on empirical mode decomposition. Adv Atmos Sci, 2010, 27: 845–854
- 38 邓拥军, 王伟, 钱成春, 等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理. 科学通报, 2001, 46: 257-263
- 39 林振山, 汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析: EMD 方法的应用. 热带气象学报, 2004, 20: 90-96
- 40 Gordon A H, Byron-Scott R A, Bye J A. A note on QBO-SO interaction, the quasi-triennial oscillation and the sunspot cycle. J Atmos Sci, 1982, 39: 2083–2087
- 41 Naujokat B. An update of the observed Quasi-Biennial Oscillation of stratospheric winds over the tropics. J Atmos Sci, 1986, 43: 1873-1877
- 42 Allan R, Lindesay J, Parker D. El Nino, Southern Oscillation and Climatic Variability. Melbourne: Australia Press, 1996
- 43 Prabhakaran Nayar S R, Radhika V N, Revathy K, et al. Wavelet analysis of solar wind and geomagnetic parameters. Solar Phys, 2002, 208: 359–373
- 44 施雅风, 沈平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24: 199-225
- 45 马晓波,施雅风,沈永平,等.西北地区近代及历史时期气候变化趋势分析.冰川冻土,2003,25:672-675
- 46 Treydte K S, Schleser G H, Helle G, et al. The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. Nature, 2006, 440: 1179–1182