



利用树轮宽度重建过去 238 年来内蒙古喀喇沁年降水量

刘禹^{①②}, 王财勇^②, 郝文俊^③, 宋慧明^{①④}, 蔡秋芳^①, 田华^①, 孙铂^{①④}, LINDERHOLM Hans W.^⑤

① 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;

② 西安交通大学人居环境与建筑工程学院环境科学与工程系, 西安 710049;

③ 内蒙古气候中心, 呼和浩特 010051;

④ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

⑤ Regional Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg 40530, Sweden

E-mail: liuyu@loess.llqg.ac.cn

2011-03-08 收稿, 2011-07-14 接受

国家自然科学基金(408900501)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-01)和黄土与第四纪国家重点实验室开放基金资助

摘要 根据树轮气候学实验步骤, 经过精确交叉定年, 建立了内蒙古喀喇沁地区油松树木年轮宽度年表。相关函数分析表明, 树轮宽度年表与上年 8 月至当年 7 月的降水总量显著相关, 在此基础上设计转换方程, 重建了该地区 1771~2008 AD 之间上年 8 月至当年 7 月的降水总量, 方差解释量达 49.3% (调整自由度后为 47.1%)。重建序列可与邻近赤峰-围场地区已有的树轮降水序列进行良好对比。在 1771~2008 AD 期间有 8 个降水量较多的时期(高于多年平均值)和 7 个降水量较少的时期(低于多年平均值), 分别反映了东亚夏季风较强和较弱的时期。功率谱分析检测出重建降水序列含有 120, 80, 8 和 2 a 左右的准周期。

关键词

内蒙古喀喇沁
油松
树木年轮宽度
降水
重建

在古气候研究中, 树木年轮是重要的代用资料之一, 它在重建过去数百至数千年尺度的温度^[1,2]、降水^[3,4]、干燥湿润指数^[5]等气候因子变化过程中发挥了重要的作用。中国的树轮气候学研究近年来也得到很大发展, 扩大了研究区域, 取得了很多重要成果。重建了青藏高原过去 2500 年以来的温度^[6-10]和 2300 余年来降水变化序列^[11-13], 重建了某些流域水文变化序列^[14,15]等。这些结果有助于我们理解在全球变化框架下过去中国气候的变化状况。在中国北方夏季风北部活动边缘带^[16], 利用高分辨率的树轮资料, 经过响应分析, 提取各地区敏感性最强的气候因子, 重建了过去数百年来温度^[17]及降水^[18-22]变化历史, 研究了东亚夏季风强弱变化及过去干湿和冷暖变化的周期规律等情况。在此基础上, 进行了我国第一个树轮降水趋势预测的研究^[23], 目前为止, 这个预测

结果基本符合当地实际降水变化趋势。

然而相对于我国北方巨大的陆地面积, 研究地点覆盖度远远不够, 因此, 在北方地区进一步加大研究地点密度, 建立树轮“场”显得非常必要和迫切。

本文通过对内蒙古东部喀喇沁树木年轮的研究, 重建当地公元 1771~2008 年上年 8 月至当年 7 月的降水量, 分析其变化特点, 并将其与历史文献记载和邻近地区已有的树轮资料对比, 揭示在较大尺度上降水变化的时空特征。

1 材料和方法

1.1 样本采集及年表建立

喀喇沁位于内蒙古东部七老图山脉东北麓, 地势西高东低, 海拔在 500~1890 m 之间。该地具有明

显的由农区向草原过渡的特点. 由于地处内陆季风气候区, 春季风大干燥, 夏季多雨高温, 秋季霜冻较早, 冬季寒冷少雪. 年平均气温 3.5~7℃, 年均降水量 421 mm 左右, 多集中在 7~8 月^[24].

采样点 (41°52'11"N, 118°47'27"E, 海拔 1108~1198 m, 图 1) 位于喀喇沁旗马鞍山国家森林公园. 当地针叶树种主要为华北落叶松 (*Larix principis-ruprechtii* Mayr) 和油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.). 采样点土壤为黄棕壤, 厚度 10~50 cm, 树间开阔, 约 20~50 m, 树冠互不相连. 基于国际树木年轮库 (ITRDB) 的标准, 2009 年 10 月中国科学院地球环境研究所在此地采集油松 29 棵, 以生长锥每树取 2 芯 (长势较好、树龄较长者取 3 芯, 备做稳定同位素分析), 命名为 KLQ.

样本带回实验室后, 经自然风干、固定、打磨处理^[25], 在显微镜下辨认年轮并计数, 经过精确交叉定年, 确保每一生长年轮具有准确的日历年龄, 最后在 LINTAB 测宽仪上对每一轮进行宽度测量 (测量精度为 0.01 mm).

为确保年代标尺准确, 采用 COFECHA^[26] 计算机程序对交叉定年的结果进行质量控制. COFECHA 分析结果显示, 各序列与主序列相关系数均值为 0.81; 平均敏感度为 0.51, 一阶自相关系数为 0.53. 统计特征说明该组样本各序列年轮宽窄变化模式非常接近, 受气候因素影响比较强烈, 年轮宽窄变化明显, 前期生长的滞后效应比较明显, 即上一年气候条件会影响树木当年的生长. 喀喇沁组最长的树轮样

本为 249 年 (1761~2009 AD). 本组样本缺轮集中发生在 1861, 1906, 1961, 1972, 1986 和 2000 AD 等年份, 缺轮率为 0.85%, 远小于其西边赤峰-围场 (CF-WC, 图 1) 的树轮缺轮率 4.4%^[20], 表明赤峰-围场比喀喇沁干旱.

本文最终用于气候分析的年表通过 ARSTAN^[27] 程序建立. 在年表建立过程中, 共剔除了 7 个与主序列吻合较差的序列, 进入最终年表的有 26 棵树 (51 个芯). 为尽可能保留低频信号, 本文使用了保守的负指数函数或直线对各个宽度序列进行拟合, 以赤池信息量 AIC (Akaike Information Criterion) 最小为依据, 对自回归模型定阶, 确定最优回归模型, 最后以双权重方法^[27] 合成年表, 得到标准化年表 (STD)、差值年表 (RES) 和自回归标准化年表 (ARS). 鉴于标准化年表兼顾了低频和低频信号的特性, 本文分析使用 STD 年表进行. 年表的起始年代以子样本信号强度 SSS (Sub-sample Signal Strength)^[28] 系数来评估确定. 设定 SSS 门限值为 0.80, 与此值相对应的 STD 年表的样本量为 3 个芯, 始于 1771 AD. 表 1 为喀喇沁树木年轮 STD 年表的统计特征.

1.2 气候响应分析

采样点附近有 4 个气象站: 承德气象站 (40°35'24"N, 117°34'12"E, 海拔 386 m), 赤峰气象站 (44°9'36"N, 118°33'36"E, 海拔 568 m), 喀喇沁旗气象站 (41°55'36"N, 118°42'5"E, 海拔 737 m) 和围场气象站 (41°55'48"N, 117°45'0"E, 海拔 843 m).

四站多年月均气象资料如图 2 所示, 降水都集中在 6~8 月, 7 月降水量最高. 对 4 个站点的气象记录进

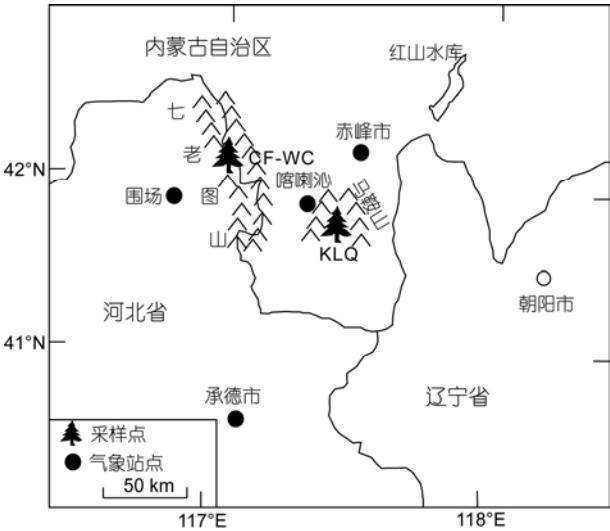


图 1 喀喇沁树轮采样点和气象站点示意图

表 1 喀喇沁树轮标准化年表 (STD) 统计特征

统计项	STD 年表
平均敏感度	0.42
标准差	0.41
峰度	0.09
偏度	0.59
一阶自相关系数	0.28
所有序列间相关系数	0.59
树间平均相关系数	0.58
单树两芯间平均相关系数	0.64
第一主成分所占方差量 (%)	60.4
样本总体代表性	0.89
SSS>0.80 的起始年	1771 (3 棵树)

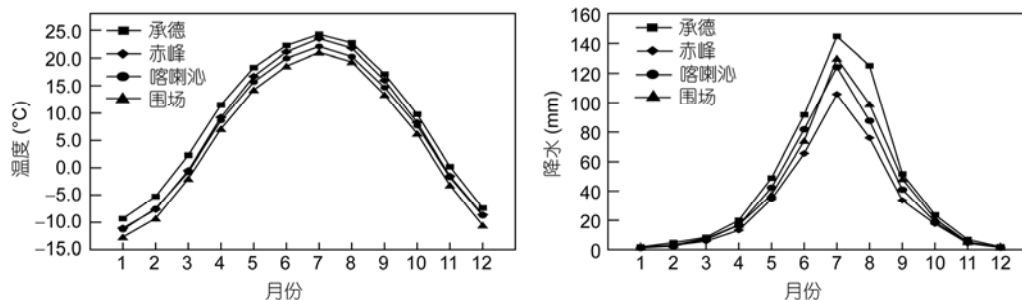
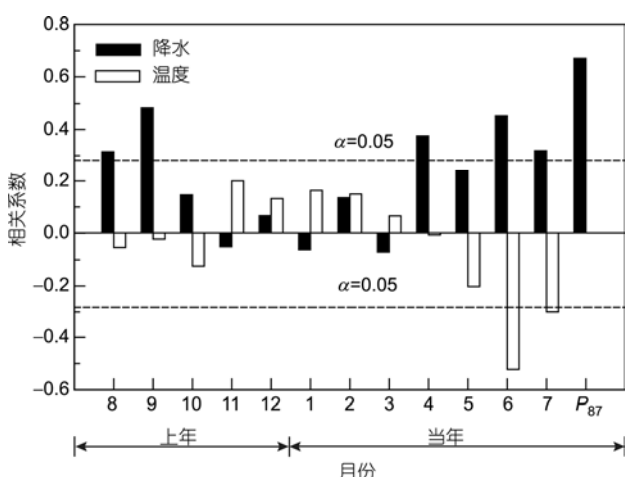


图2 喀喇沁附近4个气象站多年平均气温与降水分布图(1959~2008 AD)

行均一性和非随机性突变检验^[29,30], 结果表明四站温度、降水数据均无随机突变和明显分布不均情况, 可用于进一步分析。

为了探究树木径向生长对气候因子的响应, 本文采用相关函数计算油松树轮宽度和气象资料之间的关系。在计算和分析过程中, 采用距离采样点最近(直线距离5 km)的喀喇沁气象站的记录数据, 分析时段为1959~2008 AD。计算发现研究区树轮宽度对各月温度响应比较弱, 分别与当年6月(图3)及5~7月3个月平均温度(T_{57})达到显著相关($r=-0.52$)。而其对降水响应显著, 月份组合后, 与上年8月到当年7月降水总量(P_{87})呈显著正相关。这个响应时段与邻近地区赤峰-围场树轮^[25]响应的降水时段是一致的。偏相关计算结果, 固定 T_{57} , 树轮宽度与 P_{87} 相关显著 ($r_{\text{偏相关}}=0.54$); 固定 P_{87} 后, 树轮宽度与 T_{57} 相关不显著 ($r_{\text{偏相关}}=-0.24$)。表明, 在研究区, 树轮宽度响应的主要是降水而非温度。图3为STD年表与喀喇沁气象数据相关直方图。

图3 STD年表与喀喇沁旗气象记录数据相关性
 P_{87} , 上年8月到当年7月的降水总量

一般来讲, 在干旱、半干旱地区, 年降水量及其季节分配对整个树木年轮的形成都有影响。相关函数图表明(图3), 如果上一年气候条件良好, 降水充足, 树木在体内储存足够的养分, 加之当年生长季降水充足, 将有利于当年年轮的生长, 容易产生较宽年轮。如果上一年8~10月降水不足, 当年4~7月降水也比较少的话, 则易产生窄年轮。

1.3 转换方程

根据上述相关函数分析, STD年表与上年8月到当年7月降水总量显著相关, 因此我们设计转换方程如下:

$$P_{87} = 192.72W_t + 252.79, \quad (1)$$

($N=49$, $r=0.67$, $R^2=44.9\%$, $R_{\text{adj}}^2=43.7\%$, $F=38.33$, $P<0.0001$). 式(1)中 P_{87} 表示上年8月至当年7月的降水总量, W_t 是喀喇沁 STD 树轮年表在 t 年时的轮宽指数。

在校验期内(1960~2008 AD), 重建序列很好地反演了原始观测序列, 二者在变化幅度和趋势上具有很好的一致性(图4)。由观测数据计算得知, 上年8月至当年7月的降水总量(P_{87})与当年1~12月降水总量相关达0.75 ($P<0.0001$), 因此, P_{87} 可视为研究地区年降水量, 雨季^[16]降水总量占全年的68.3%, 表明研究区降水主要是东亚夏季风带来的季风降水。

重建方程的校验结果见表2。原始与观测2个序列符号检验值的同号数 S_1 为32个, 超过了95%置信度检验。2个序列的一阶差符号检验值 S_2 的同号数为41个, 通过了99%置信度检验, 表明重建与实测序列在95%置信度上高频和低频变化都比较吻合。乘积平均数 t 为5.66, 超过了99%置信度的临界值(3.50)。误差缩减值 RE 为0.45。这些检验参数均表明重建方程稳定可靠。

此外, 进一步采用 Bootstrap 和 Jack-knife 统计方法^[31,32]来校验模型。Bootstrap 方法是从待分析的数据

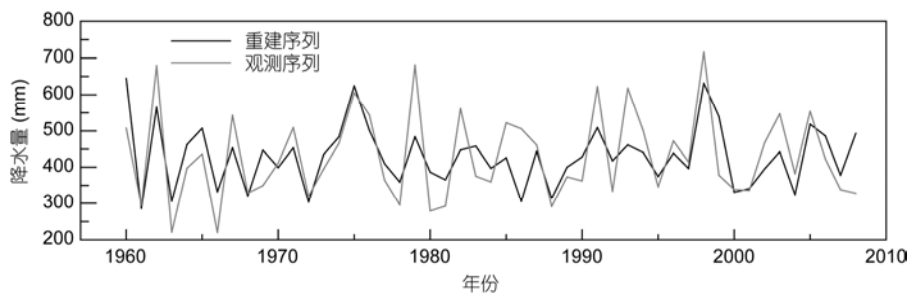


图4 喀喇沁地区重建与观测的上年8月到当年7月降水量对比 (1960~2008 AD)

表2 重建方程校验结果^{a)}

重建组合	重建时段	r	F	S_1	S_2	t	RE
P_{87}	1960~2008 AD	0.67	38.33	32 (32*, 34**)	41 (32*, 34**)	5.66	0.45

a) *表示超过 95%的置信度; **表示超过 99%的置信度

中随机重新取样, 代替原有数据, 重建一系列与原数据同样大小的数据集, 从而减少统计推断偏差, 并依靠数据本身产生的临界值, 为检验提供更为精确、可靠的参量, 该方法克服了传统检验中统计量非规则渐进分布的问题. 本文采用进行 100 次迭代运算之后各统计量的平均值来评估回归方程的精确性.

Jack-knife 检验法其实就是逐一剔除法, 它是相继剔除二个时间序列中的其中一年及对应的一组数据, 然后计算二个序列的相关系数, 重新建立回归方程, 检验回归方程的统计量是否有较大改变, 如果没有, 则说明重建方程比较稳定. 这个过程中新建的数据集要比原始数据集小, 而且不包含重复数据. 本文 Jack-knife 检验结果提示 1986 AD 比较异常, 实际降水较多(P_{87} 为 506 mm), 而重建值较小, 仅 304 mm. 观测数据显示 1986 AD 5 和 6 月份的降水量只有 8.5 和 68 mm, 分别比多年平均值低 80%和 17%, 而 5 和 6 月份的平均温度达到 16.2℃和 21℃, 均高于这两个月各自的多年平均值. 因此, 在树木速生期的 5 和 6 月份, 一方面, 降水量极少导致树木生长得不到充足的水分; 另一方面, 高温使得树木蒸腾作用和呼吸作用加剧. 这两个原因导致该年形成窄轮. 虽然后期 7~9 月降水量有所升高, 但已经来不及对当年(1986 AD)树轮的生长产生决定性影响了. 如果去掉这一年, 相关系数会提高到 0.71 ($R^2 = 50.6\%$, $R^2_{adj} = 49.6\%$, $F = 47.21$, $P < 0.0001$). 但在模型中, 1986 AD 并没有被去除, 因为我们不能确定同样的情况在过去不会发生.

以上两种方法的统计检验结果见表 3, 检验的主要统计量包括 r , R^2 , R^2_{adj} , 标准差(SE), F 值和 Durbin-

Watson (D/W)值, 其中 Durbin-Watson 值分别为 2.08 和 2.12, 处于无自相关区间(当 $N=49$, $1.40 < D/W < 2.60$ 时, 则表明序列无显著一阶自相关). 总体上来说, 两种检验的各统计量与原始回归方程的统计结果非常接近, 表明重建方程是稳定可靠的.

除此之外, 喀喇沁周围气象站赤峰、围场、承德的 P_{87} 降水记录均可用来对本文重建结果进行检验. 在观测期内上述四站 P_{87} 显著相关, 本文重建 P_{87} 也与这些观测记录显著相关(图 5, 表 4). 这不仅检验了重建结果的可靠及精确, 而且也反映出较大范围内降水变化年际尺度内的同步性.

2 结果与讨论

2.1 公元 1771~2008 AD P_{87} 降水量重建

根据方程(1), 重建了喀喇沁公元 1771~2008 AD

表3 喀喇沁 P_{87} 降水总量 Bootstrap 和 Jack-knife 检验结果

统计量	建模期 (1960~2008 AD)	检验时期 (1960~2008 AD)	
		Bootstrap (迭代 100 次)平均值 ^{a)}	Jack-knife 平均值 ^{a)}
r	0.67	0.67 (0.43~0.83)	0.67 (0.62~0.71)
R^2	44.9%	45% (24%~72%)	45% (39%~51%)
R^2_{adj}	43.7%	44% (23%~71%)	44% (37%~50%)
SE	91.44	89.56 (70.75~109.00)	91.43 (86.68~92.43)
t	8.03	8.00 (4.98~10.58)	7.96 (7.50~8.47)
F	38.33	42.76 (15.21~119.49)	37.63 (28.74~47.21)
P	0.0001	0.0001	0.0001
D/W	2.12	2.06 (1.65~2.41)	2.12 (1.90~2.27)

a) 括号内为取值范围

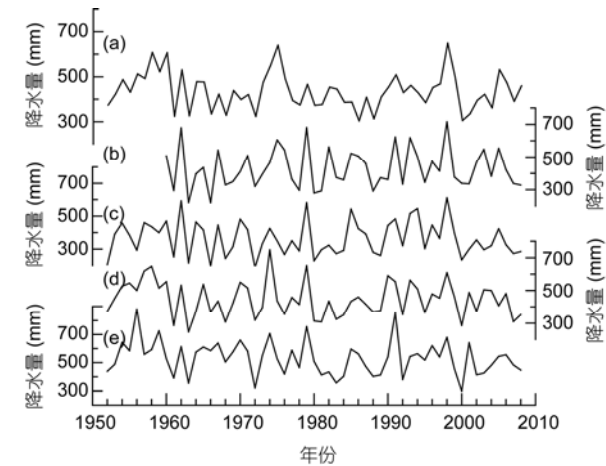


图5 P_{87} 降水对比图

(a) 喀喇沁重建降水; (b) 喀喇沁气象记录; (c) 赤峰气象记录; (d) 围场气象记录; (e) 承德气象记录

上年8月至当年7月的降水总量. 重建序列为238年, 平均值(Mean)为440 mm, 标准差(σ)为79 mm. 这条降水曲线反映了喀喇沁过去230余年中的多次干湿

波动. 本文定义, 降水量大于 $\text{Mean}+1\sigma (=519 \text{ mm})$ 为湿润年, 低于 $\text{Mean}-1\sigma (=361 \text{ mm})$ 时为干旱年, 降水量在两者之间时为正常年. 在过去238年中, 湿润年计37年, 干旱年41年, 分别占重建总年份的15.5%和16.8%, 干旱年份略多于湿润年份. 历史记载^[33]的1784~1786 AD (乾隆后期)发生的严重干旱事件被树轮记录捕捉到了. 这次严重干旱是喀喇沁地区过去230余年来最为严重的一次干旱事件(3年降水均值为319 mm), 比多年平均值低27%. 2000 AD在我国西北、华北发生了严重干旱事件, 也被重建序列所证实. 据报道^[34], 当年内蒙古赤峰市周边地区6条河断流, 34座水库干涸. 当时降水总量也达到了极低值点. 喀喇沁2000 AD观测降水总量为331 mm, 树轮重建值为305 mm, 分别比多年平均值440 mm低23%和31%.

1998 AD, 中国大部分地区(包括东北)偏涝, 降水偏多. 此次事件在本文重建结果中也准确地反映出来(图4~6). 该年降水重建值649 mm, 高出多年平均值48%, 可见1998 AD的洪涝灾害也蔓延到该地区.

表4 喀喇沁、赤峰、围场、承德及本文重建 P_{87} 降水相关结果 $r(P<0.0001)$

	喀喇沁 1960~2008 AD	赤峰 1952~2008 AD	围场 1952~2008 AD	承德 1952~2008 AD	重建 1952~2008 AD
喀喇沁	1.00				
赤峰	0.78	1.00			
围场	0.64	0.74	1.00		
承德	0.53	0.60	0.70	1.00	
重建	0.67	0.57	0.61	0.47	1.00

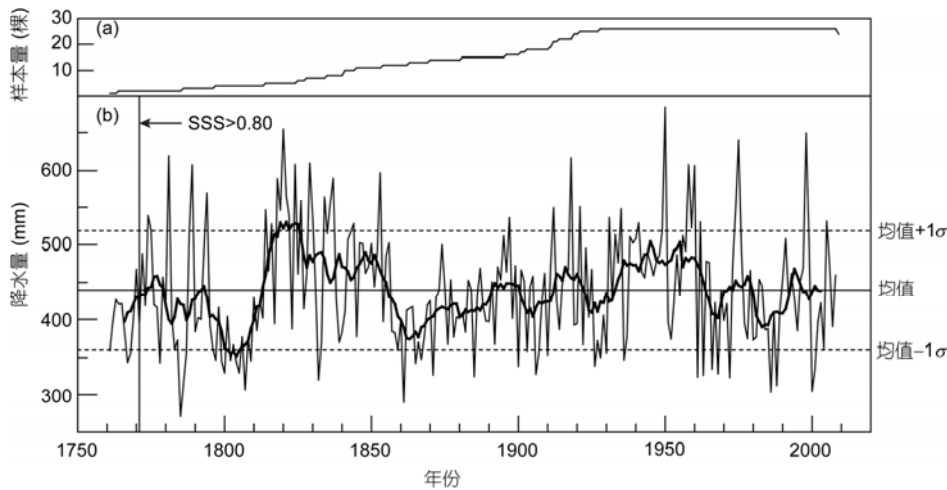


图6 喀喇沁地区1771~2008 AD全年降水量重建曲线

(a) 样本量; (b) 降水量重建曲线. (b) 中平滑线为11 a滑动平均, 直线为1771~2008 AD降水平均值

对重建序列 11 a 滑动平均后, 从图 6 中可以直观看出, 1771~2008 AD 期间喀喇沁年降水重建序列可以划分出 8 个降水量较多的时期(高于 440 mm): 1774~1779 AD, 1813~1855 AD, 1892~1900 AD, 1901~1912 AD, 1913~1922 AD, 1933~1963 AD, 1972~1979 AD 和 1993~1996 AD. 其中存在 2 个持续时间较长的湿润期: 1813~1855 AD, 1933~1963 AD. 序列中同时也存在 7 个降水量较少的时期(低于 440 mm): 1780~1812 AD, 1856~1891 AD, 1901~1912 AD, 1923~1932 AD, 1964~1971 AD, 1980~1992 AD 和 1997~2000 AD. 其中有 3 个相对较严重的干旱期: 1794~1812 AD, 1856~1891 AD 和 1980~1992 AD, 其中 1794~1812 AD 间的干旱最为严重, 而 1856~1891 AD 间的干旱持续时间最长. 20 世纪 60 年代以来, 降水总体偏少, 进入少雨期^[35,36], 但仍在正常范围内波动.

2.2 旱涝指数与重建降水序列的对比

由历史文献所划分的我国各个地区过去 500 年旱涝指数^[37]是研究过去气候变化的重要资料, 它可以用来与树轮重建资料进行相互对比、交叉检验. 年际间, 喀喇沁重建降水序列与旱涝指数二者相关为 $r = -0.19$ (1771~1979 AD, $P < 0.01$), 1900 AD 之后, 二者相关为 $r = -0.28$ (1900~1979 AD, $P < 0.05$). 一定程度上, 在年际间高频变化上旱涝指数对树轮重建结果提供了佐证, 但 11 a 滑动平均后的两个序列各自反映的气候信息差异较大(图 7).

2.3 喀喇沁年降水序列与赤峰-围场降水序列的比较

距喀喇沁最近的树轮研究地点在赤峰-围场, 同处于季风活动边缘带, 且研究树种也为油松^[20], 这为二地的树轮重建结果对比提供了可能. 经计算, 年际间二个序列的相关系数 $r = 0.32$ (1768~2003 AD, P

< 0.0001), 11 a 滑动平均后, $r = 0.39$ ($P < 0.0001$), 而且 11 a 滑动后, 两个地区年降水量在趋势上基本一致(图 8), 干旱年份出现同步, 如: 1800~1805 AD, 1861~1866 AD, 1903~1906 AD, 1966~1968 AD, 1981~1986 AD. 但总体来说, 喀喇沁降水量比赤峰-围场高. 在 1815~1865 AD 和 1925~1960 AD 二个时期内, 喀喇沁重建降水量明显高于赤峰-围场. 而在 1866~1924 AD 和 1986~1998 AD 间, 两地降水变化不仅趋势一致, 连变化幅度也是一致的. 如前所述, 喀喇沁与赤峰-围场的降水曲线在某种程度上共同反映了东亚夏季风在研究地区的变化历史. 因此, 在喀喇沁地区, 降水多的年份反映了夏季风较强, 降水少的年份反映夏季风较弱. 在年代际尺度上, 湿润期表明夏季风连续较强, 干旱时期则反映夏季风连续较弱.

功率谱分析检测出重建年降水序列含有 120, 80, 8, 2.42, 2.11, 2.09, 2.07, 2.02 a 等准周期(图 9). 其中 80 a 周期, 可能与北大西洋温盐环流 70 a 左右的周期^[14]相呼应, 2 a 左右的准周期反映出与海陆耦合相关的准两年波动(TBO, Tropospheric biennial oscillation)^[38]. 这些表明喀喇沁降水变化可能与大范围气候变化有一定联系.

3 结论

(1) 本文依据现代树木年轮气候学方法, 对采自内蒙古东部喀喇沁的油松树轮样本进行了气候响应分析, 设计转换方程, 重建了该地区 1771~2008 AD 上年 8 月到当年 7 月的降水总量, 采用现代统计技术对重建结果进行了检验, 确定重建的可靠性, 在此基础上分析了喀喇沁降水变化的特征.

(2) 喀喇沁过去 238 年中有 2 个持续时间较长的湿润期: 1813~1855 AD, 1933~1963 AD; 有 3 个相对较严重的干旱期: 1794~1812 AD, 1856~1891 AD,

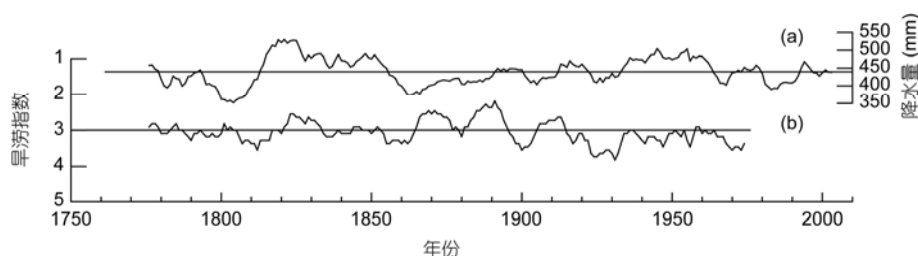


图 7 1771~1979 AD 喀喇沁重建 P_{87} (a)与赤峰旱涝指数(b)对比曲线
曲线均经 11 a 滑动平均. (b)中纵坐标数字 1, 涝; 2, 偏涝; 3, 正常; 4, 偏旱; 5, 旱

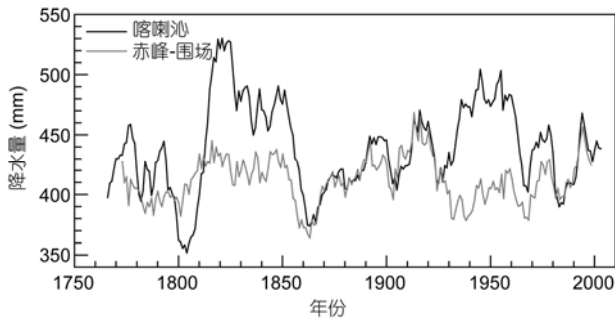


图8 喀喇沁与赤峰-围场地区 P_{87} 降水量对比
曲线均经过 11 a 滑动平均

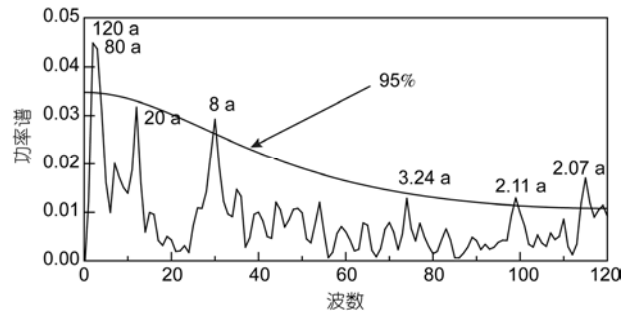


图9 喀喇沁重建降水序列功率谱分析图
Lag=120 a

1980~1992 AD.

(3) 确认了 1784~1786 AD 严重干旱事件在喀喇沁地区的存在. 经对比, 本文与附近赤峰-围场的树轮年降水序列具有良好的一致性, 2 条曲线在某种程度上共同反映了东亚夏季风在研究地区大范围内强度的变化. 在喀喇沁地区, 降水多的年份反映了夏

季风较强, 降水少的年份反映夏季风较弱. 在年代际尺度上, 湿润期表明夏季风连续较强, 干旱时期则反映夏季风连续较弱. 20 世纪 60 年代以来, 降水总体偏少, 进入少雨期, 但仍在正常范围内波动.

(4) 喀喇沁降水序列存在 120, 80, 8 和 2 a 左右等准周期, 表明降水序列与大范围气候变化有一定联系.

致谢 感谢中国科学院地球环境研究所的包光、王艳超、雷莺、沈保发、孙军艳、王滢尘、解利、王瑞媛等在采样、分析过程中给予的帮助.

参考文献

- 1 Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, et al. Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. *J Geophys Res A*, 2001, 106: 2929–2941
- 2 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
- 3 D'Arrigo R, Jacoby G A. 1000-year record of winter precipitation from northwestern New Mexico, USA: A reconstruction from tree-rings and its relation to El Niño and the Southern Oscillation. *Holocene*, 1991, 1: 95–101
- 4 Pederson N, Jacoby G C, D'Arrigo R D, et al. Hydrometeorological reconstructions for Northeastern Mongolia derived from Tree Rings: AD 1651–1995. *J Clim*, 2001, 14: 872–881
- 5 Cook B I, Miller R L, Seager R. Amplification of the North American “Dust Bowl” drought through human-induced land degradation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 4997–5001
- 6 刘禹, 安芷生, Linderholm H W, 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
- 7 Yang B, Kang X C, Brauning A, et al. A 622-year regional temperature history of southeast Tibet derived from tree rings. *Holocene*, 2010, 20: 181–190
- 8 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
- 9 Liang E Y, Shao X M, Qin N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global Planet Change*, 2008, 61: 313–320
- 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 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
- 12 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
- 13 Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, et al. A 2326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1739–1742

- 14 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
- 15 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. *中国科学: 地球科学*, 2010, 55: 3236–3243
- 16 徐袁, 钱维宏. 东亚季风边缘活动带研究综述. *地理学报*, 2003, 58: 138–146
- 17 刘禹, 田华, 宋慧明, 等. 油松年轮记录的河北围场公元 1884 年以来 5~6 月平均温度. *第四纪研究*, 2009, 29: 896–904
- 18 王丽丽, 邵雪梅, 黄磊, 等. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应. *植物生态学报*, 2005, 29: 380–385
- 19 Liu Y, Bao G, Song H M, et al. Precipitation reconstruction from Hailar pine tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, 2009, 282: 81–87
- 20 Liu Y, Tian H, Song H Y, et al. Tree ring precipitation reconstruction in the Chifeng-Weichang region, and East Asian summer monsoon variation since AD 1777. *J Geophys Res*, 2010, 115: D06106
- 21 Liu Y, Sun J Y, Yang Y K, et al. Tree-ring precipitation records from Inner Mongolia, China, and the East Asian summer monsoon front variation since 1627 AD. *Tree-ring Res*, 2007, 63: 3–14
- 22 Liu Y, Cai Q F, Shi J F, et al. Seasonal precipitation in the south-central Helan Mountain region, China, reconstructed from tree-ring width for the past 224 years. *Can J For Res*, 2005, 35: 2403–2412
- 23 刘禹, Shishov V, 史江峰, 等. 内蒙古西部贺兰山和东部白音敖包未来 20 年降水趋势预测. *科学通报*, 2004, 49: 270–274
- 24 王文辉. 内蒙古气候. 北京: 气象出版社, 1990. 1–273
- 25 Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968. 1–73
- 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, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology*. The Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 1–200
- 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 Clim Appl Meteor*, 1984, 23: 201–213
- 29 Kohler M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1949, 30: 188–189
- 30 Mann H B. Non-parametric test against trend. *Econometrika*, 1945, 13: 245–259
- 31 Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jackknife. *Ann Stat*, 1979, 7: 1–26
- 32 Shao J, Tu D. *The Jackknife and Bootstrap*. New York: Springer Series in Statistics, 1995. 1–516
- 33 张德二. 中国历史气候记录揭示千年干湿变化和重大干旱事件. *科技导报*, 2004, 8: 47–50
- 34 魏牲生. 中国历史上的干旱. *热点关注*, 2009, 4: 16–18
- 35 Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int J Climatol*, 2007, 28: 1139–1161
- 36 Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes. *Int J Climatol*, 2009, 29: 1926–1944
- 37 中央气象局气象科学研究院. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981. 1–332
- 38 Meehl G A, Arblaster J M. The Tropospheric biennial oscillation and Indian Monsoon rainfall. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1731–1734