

# 140年来腾格里沙漠南缘树木年轮记录的降水量变化

高尚玉 鲁瑞洁\* 强明瑞 哈斯 张登山 陈原 夏虹

(北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院沙漠与沙区资源研究所, 北京 100875.)

\* 联系人, E-mail: [ruijelu@ires.cn](mailto:ruijelu@ires.cn)

**摘要** 根据腾格里沙漠南缘油松(*Pinus tabulaeformis*)的树轮宽度指数, 重建了140年来该地区的降水过程. 结果表明, 最近140年来腾格里沙漠南缘经历了明显的干湿波动, 出现1868~1876年和1932~1939年两个湿润期, 以及1877~1894年(其中1887, 1888略为湿润)和1924~1932年两个干旱期, 1895~1923年、1940~2000年期间有轻微的干湿变化. 其中湿润期降水量增加幅度达到56%, 干旱期降水量减少幅度达到42%, 降水量变化幅度超过30%的一共有19年. 从总的变化来看, 近140年来, 本区降水没有明显的增减趋势. 但是1940年以后, 降水波动出现幅度变小、频率增加的趋势. 功率谱分析表明, 腾格里沙漠南缘地区降水具有显著的2.46~2.64 a以及11.67 a周期.

**关键词** 腾格里沙漠南缘 油松 树轮宽度 降水重建

腾格里沙漠是中国的第四大沙漠, 在生物气候带上处于西部干旱荒漠与东部半干旱草原之间的干旱荒漠草原过渡带位置. 同时, 腾格里沙漠的南界也正是中国沙漠(甚至包括沙地)分布的最南界, 这一带的地表过程复杂而多变, 对气候变化和人类活动的反应都十分敏感.

目前已经有学者利用湖泊沉积以及风成沉积资料等对腾格里沙漠南缘的环境演变进行了分析与探讨<sup>[1-3]</sup>, 但是由于沙漠地区的湖泊沉积以及风成沉积资料固有的缺陷, 已有工作的分辨率普遍较低, 在反映沙漠近代气候环境变化方面不够理想.

树木年轮具有定年准确、分辨率高的优势, 并且干旱地区的树轮能够准确、清楚的反映对人类影响最大的极端气候事件, 这一点已经得到广泛认同<sup>[4-8]</sup>. 本文利用取自腾格里沙漠南缘昌灵山的树木年轮资料, 通过建立标准化年表并提取该区高分辨率的气候变化信息, 恢复了腾格里沙漠南缘140年来的年降水量变化, 这将为腾格里沙漠近百年来的环境演变研究, 特别是为认识近百年甚至是近几十年来沙漠南部边缘沙漠化土地的发展变化提供高分辨率资料, 并为预测沙漠边缘地区人类生存环境的未来变化趋势服务.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

昌灵山是北祁连东延北伸的一座孤岛状基岩山地, 也是沙漠-黄土边界带上的一座“绿岛”, 北距腾

格里沙漠仅8 km, 是中国距沙漠最近的天然森林区(图1). 山地基带为半干旱荒漠草原带, 年平均气温约4.9℃, 降雨量306.7 mm. 昌灵山总面积50.14 km<sup>2</sup>, 地势东高西低, 海拔2250~2900 m, 主峰海拔2954 m, 与基带高差达400~700 m<sup>[1]</sup>. 山地具有明显的垂直带谱, 由下至上依次为荒漠草原带, 落叶阔叶林带, 针叶林带以及灌丛带. 气候属温带干旱气候向高寒半干旱气候过渡的气候. 林下土壤为灰褐森林土. 山地针叶林的建群种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、青海云杉(*Picea Crassifolia*)和祁连圆柏(*Sabina pizewalskii*)等, 这些树种都已经被证明适于利用树轮宽度进行气候变化研究<sup>[6,9-11]</sup>.

### 1.2 样品采集及处理方法

野外取样沿昌灵山山脊线进行, 取样树种为油松, 所取树木的高度一般在15~20 m, 胸径35~55 cm. 取样点海拔高度在2400~2600 m之间, 森林郁闭度一般小于15%, 取样时间为2003年8月. 按照国际树木年轮库(ITRDB)的标准, 采取了21棵树, 用内径为5.3 mm的生长锥从每棵树的阳面、阴面分别钻取1芯, 个别树龄较长的取3芯, 共44芯.

根据树木年轮样本处理的基本程序<sup>[4,12]</sup>, 对样本进行预处理(粘贴、固定、打磨)、交叉定年(主要利用骨架图定年<sup>[12]</sup>)、宽度测量和结果检验. 宽度测量利用精度为0.01 mm的LINTAB宽度测量仪进行; 在宽度测量完以后, 利用计算机程序COFECHA和TSAP

1) 资料来源: 古浪县林业局

对定年结果进一步检查, 确保交叉定年的准确性, 并保证剔除测量过程中发生的随机误差。

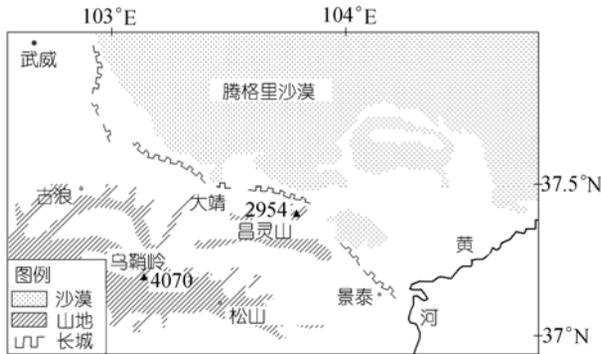


图 1 取样点位置图

### 1.3 气候资料的选取

采样点周围有古浪、武威、景泰、松山和乌鞘岭五个气象台(站), 经综合考虑后, 选用了距取样点直线距离 50 km、且海拔高度接近的甘肃省乌鞘岭气象站(37°12'N, 102°52'E,  $h = 3045$  m, 记录时段 1951~1998)。经初步检验确认, 乌鞘岭气象站的记录可靠, 无明显的随机误差。考虑到前一年的气候状况可能对当年的树木生长产生一定影响, 结合当地油松的生长季节(5 月至 8 月), 本研究所采用的气候要素为上一年 9 月至当年 8 月的月平均温度、月降水量。

## 2 结果与分析

### 2.1 年表的建立及其特征

利用程序 COFECHA 对交叉定年以及测量结果的检验结果显示: 本文获取的 44 个样芯全部可用,

其中时间序列最长的为 1639~2002 年。在准确定年的基础上, 运用 ARSTAN 程序, 采用步长为 60 a 的样条函数对树轮宽度序列进行了生长趋势的拟合, 并利用去趋势序列建立了树木年轮标准化年表(STD)(图 2)。此外, 还对去生长趋势序列进行了 1899~2000 年的共同区间分析<sup>[13,14]</sup>。

对标准化年表统计特征及共同区间的分析结果表明(表 1), 样本的平均敏感度较高(0.413), 反映树木生长对本地区环境变化相当敏感, 足以用相关函数的方法来研究树木生长与环境因子间的关系<sup>[15]</sup>; 树间的平均相关系数为 0.569, 各序列与主序列相关系数平均值为 0.764, 说明各单株间年轮的年径向生长较为一致, 是受相似环境因子影响的结果。另外, 序列的信噪比为 26.436, 样本量的总体代表性(96.4%)以及第一主成分解释方差量(59.13%)也比较高, 说明标准化年表序列包含较多的环境信息, 所建立的标准年表适合于年轮气候学的研究。

### 2.2 树木径向生长对气候要素的响应分析

对 STD 年表与乌鞘岭气象站的月平均温度、月降水量进行相关分析的结果(表 2)表明, 年表与年降水量(前一年 9 月至当年 8 月)的相关关系十分显著, 相关系数为 0.533, 超过了 99% 相关检验的置信区间; 年表与 6~8 月平均温度的相关系数(-0.289)也通过了 95% 的置信区间, 相关关系比较显著。但是从分析结果看, 树木生长对降水的响应大于对温度的响应, 并且采样点处于干旱向半干旱气候过渡的地区, 这也符合当地情况。单从对降水的响应看, 树木生长与前一年 9 月的降水最为相关, 这种响应关系是由树木生理过程所决定的。在前一年 9 月, 虽然降水量很高,

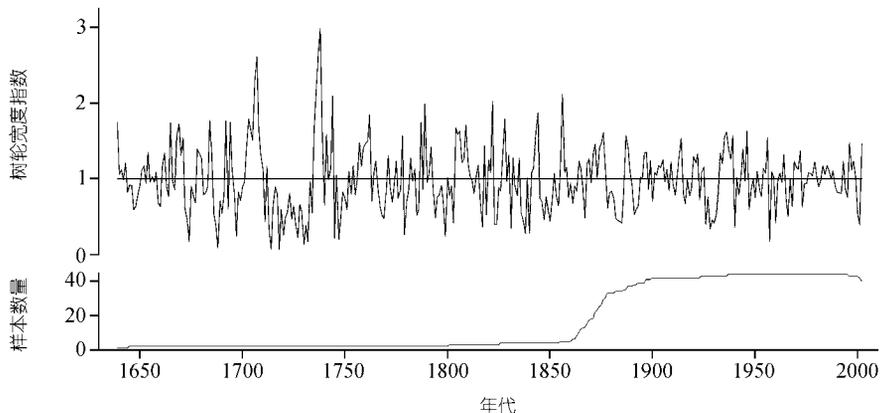


图 2 腾格里沙漠南缘标准化年表

表 1 年表统计特征及共同区间分析结果<sup>a)</sup>

MI	Q	MS	SD	S	K	AC	R	Rt	SNR	EPS	PCL
0.985	0.957	0.413	0.436	0.764	1.717	0.378	0.764	0.569	26.436	0.964	59.13%

a)表中 MI: 平均值; Q: 中位数; MS: 平均敏感度; SD: 标准差; S: 偏度; K: 峰度; AC: 一阶自相关系数; R: 各序列与主序列相关系数平均值; Rt: 树与树间平均相关系数; SNR: 信噪比; EPS: 样本量总体代表性; PCL: 第一主成分解释方差量

表 2 STD 年表与气象资料之间的相关关系<sup>a)</sup>

-9P	-10P	-11P	-12P	1P	2P	3P	4P	5P	6P	7P	8P	-9-8P
0.512**	0.14	0.209	-0.032	0.094	0.037	0.232	0.274	0.208	0.171	0.185	0.172	0.533**
-9T	-10T	-11T	-12T	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	6-8T
-0.138	-0.06	-0.005	0.187	-0.303*	-0.018	-0.221	0.114	0.189	-0.27	-0.14	-0.199	-0.289*

a)表中\*\*说明通过 99%相关检验的置信区间; \*说明通过 95%相关检验的置信区间

但是受温度影响, 树木径向生长已经基本停止, 然而却为树木来年的生长提供了必要的水分条件. 考虑到重建要素的意义, 本文最终选定利用乌鞘岭气象站的资料对腾格里沙漠南缘的年降水量(前一年 9 月至当年 8 月)进行重建.

### 2.3 转换方程的建立

传统树木年轮气候学认为, 树木年轮生长状况可能会受前期的生长影响, 即与前期气候状况有关; 同时, 当年的气候状况可能会影响后几年树木的生长<sup>[4]</sup>. 因此, 要重建某年的气候, 必须考虑前期和后期若干年的年轮宽度指数. 基于这一点, 我们在 STD 年表(STD<sub>t</sub>)的基础上, 制作了另外四个年表: 前一年(STD<sub>t-1</sub>), 前二年(STD<sub>t-2</sub>), 后一年(STD<sub>t+1</sub>)和后二年(STD<sub>t+2</sub>). 在重建过程中, 综合考虑树木当年以及前后两年的宽度指数, 重建前一年 9 月至当年 8 月的总降水量  $p$ . 考虑到树木年轮年表的可靠区间(SSS>85%)<sup>[14]</sup>, 本文选取的重建时段为 1860~2000 年. 尝试多种方法建立转换函数后, 最终选取了进行经验正交函数(EOF)分解后, 利用其中四个主成分作为预报因子, 建立的转换方程:

$$p = EXP[5.9061 + 0.1202P_{01} - 0.0108P_{02} - 0.1107P_{03} + 0.07476P_{04}]$$

其相关系数和方差解释量分别为 0.6454 和 41.7%, 调整后的方差解释量为 36.1% ( $F=7.496, P<0.0001$ ).

虽然本方程的方差解释量不是特别高, 但我们的重建序列的可信度仍然很高. 已经有研究表明, 使用距离取样点较远的气象观测数据, 可能低估树木对气候的响应, 导致解释方差量变小, 比如把距离取样点 60 km 的气象数据换为 6 km 远的气象数据后, 气候的方差解释量从 34% 上升为 45%<sup>[7,16]</sup>. 本研究中采样点距离气象台站超过 50 km, 这可能是方差解释量

较小的一个重要原因.

将气象记录时段的观测值与重建值进行比较(图 3)可以看出, 两条曲线对应比较好, 在 1975 年以前, 具体数值与趋势二者都非常一致, 1975 年以后在具体数值上有些差距, 但是两条曲线的变化趋势仍然非常一致. 这可能是因为本地区 1975 年以后虽然降水量有上升的趋势, 但是同期升温趋势更为明显, 温度升高导致蒸发量增加, 因此虽然降水量增加了, 但是树木实际得到的水分并没有增加, 因此导致重建序列体现出的降水量增加趋势不及实测序列明显. 有关本地区树木年轮与温度之间的关系将在以后进一步分析.

由于气象资料的时序较短, 本研究采用了逐一剔除法对转换方程的稳定性及可靠性进行了检验, 所采用的具体方法为符号检验、乘积平均值检验、误差缩减值检验<sup>[4,17]</sup>. 检验结果显示, 重建序列与观测序列的一阶差值符号检验值以及重建序列与观测序列相对于观测序列平均值差值的同号数均超过了 95% 置信度临界值, 并且接近 99% 置信度临界值, 说明两序列在高频变化与低频变化上都比较吻合. 乘积平均值检验中的  $t$  值达到 3.0541, 通过了 99% 置信区间的检验, 说明重建序列与实测序列比较接近. 本研究中为误差缩减值检验 RE 为 0.2712, 也说明了所建立的转换方程稳定可靠.

### 2.4 降雨量变化的重建

依据建立的转换方程, 重建了 1860~2000 年腾格里沙漠南缘的年降水量. 从降水量距平变化曲线(图 4)可以看出, 最近 140 多年来腾格里沙漠南缘经历了明显的干湿变化, 整个序列出现了几个持续时间较长的干湿期. 湿润期与干旱期交替出现, 其中湿润期降水量增加幅度达到 56%, 干旱期降水量减少幅度

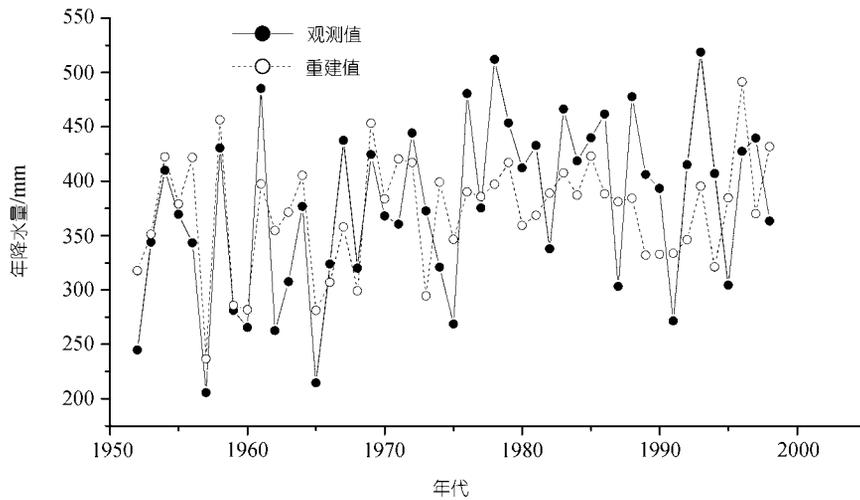


图 3 气象记录时段降水量重建值和实测值之间的对比

达到 42%。降水量变化幅度超过 30% 的一共有 19 年。降水量明显增多的年份为 1871, 1874~1876, 1887, 1935~1937, 1946, 1996; 降水量较少的年份包括 1882~1884, 1926, 1928~1930, 1940, 1957。

1868~1876 年和 1932~1939 年为两个明显的湿润期。通常情况下, 年降水量的增加与当年发生的暴雨紧密相关。《西北灾荒史》<sup>[18]</sup> 记载: 1867 年 8 月 14 日洪水, “漂没人畜以千计”; 1871 年 5 月 22 日洪水, “淹杀二百一十二人”; 1933 年 6 月 15 至 19 日, 景泰“山水爆发, 沿河禾苗概被冲没”, 7 月 8 日, 山水骤发; 1934 年 9 月 23 日, 武威“大雨如注, 冲没田地、庄房、人口、牲畜、并场上麦捆不计其数”; 1936 年 7 月底, 武威“大雨冲毁渠坝、桥梁、田地、房屋、水磨甚多”; 1943 年景泰、古浪、武威均被水灾。另外根据《中国近五百年旱涝分布图集》, 研究区 1868~1875 年偏涝<sup>[19]</sup>。这些与重建序列表现出的湿润期基本一致。

1877~1894 年(其中 1887, 1888 略为湿润)和 1924~1932 年为两个明显的干旱期。另外, 虽然因为序列的长度限制不能确定 1860~1867 年所处干旱期持续的时间, 但是可以看出这一段时期也比较干旱。《西北灾荒史》<sup>[18]</sup> 记载: 1857~1871 年, 西北共发生大旱 7 次; 1877~1884 年, 西北发生毁灭性大旱, 其中 1877 年甘肃“全省苦旱”; 1924~1933 年, 西北地区大旱 8 年, 其中 1928~1930 为毁灭性大旱, 在这段干旱时期, 武威、景泰、古浪有旱灾记录的包括 1924, 1926, 1928~1933 年共八年; 1937~1947 年中西北大旱 9 年, 其中 1938, 1940~1942, 1945~1947 年, 文献中均有古

浪、景泰以及武威地区的旱灾记录, 1940 年古浪“自春徂夏, 未降滴雨”, 1942 年景泰“千里赤地, 哀鸿遍野”, 古浪“连旱三载, 田亩成淌土”, 1947 年, 景泰、武威被旱灾, 古浪“旱灾奇重、民不聊生”。《古浪县志》<sup>[20]</sup> 记载 1959~1975 为相对干旱期, 1976~1980 为相对不旱期。这些记录与本研究重建的序列均非常吻合, 尤其是两次“毁灭性大旱”在序列中表现的尤为突出。

从曲线总的变化幅度与趋势来看, 近 140 年来, 本区降水没有明显的增减变化, 并无明显变湿或变干的趋势。但 1940 年以前, 本区降水的波动幅度较大; 1940 年以后, 降水的波动幅度变小但频率增加。

### 2.5 周期分析

为了检验重建序列的规律性, 对重建序列进行了功率谱分析<sup>[21]</sup>。分析结果(图 5)表明重建序列具有显著的 2.46~2.64 a 以及较为显著的 11.67 a 的周期。袁林通过分析发现西北干旱灾害具有 11 a 的准周期<sup>[18]</sup>, 这与我们分析得出的 11.67 a 的周期接近, 说明我们的重建结果比较可信。另外已经有研究证明 ENSO 循环对甘肃省的降水变化有明显影响<sup>[22,23]</sup>。目前一般公认 ENSO 具有 2.5~7 a 的周期<sup>[24-27]</sup>, 这与本研究重建的年降水量序列表现出的周期一致, 进一步说明腾格里沙漠南缘的降水量可能受 ENSO 的影响, 同时也说明腾格里沙漠南缘地区不仅含有局部的区域气候信号, 同时也受到全球大尺度气候变化的影响。

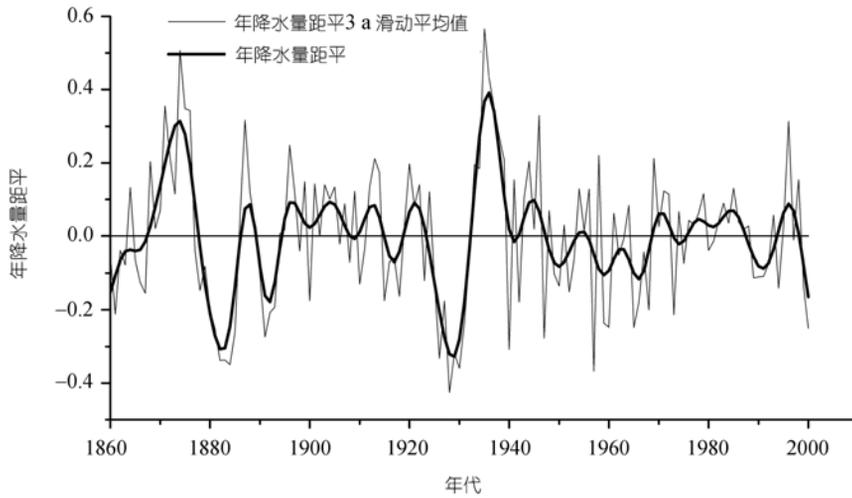


图4 1860年以来年降水量重建值距平

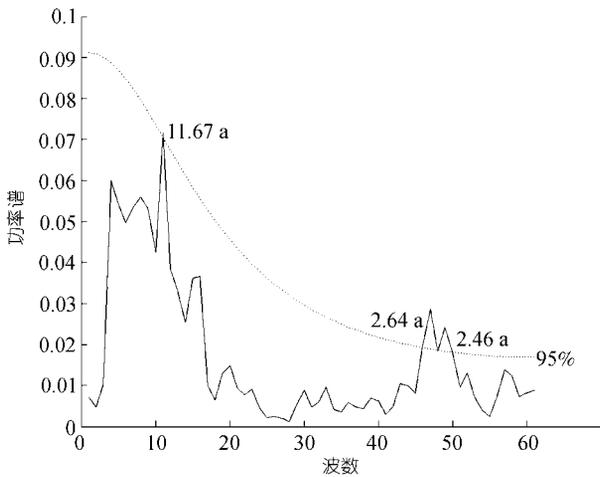


图5 腾格里沙漠南缘年降水量重建序列功率谱分析结果

### 3 结论与讨论

通过对取自腾格里沙漠南缘的油松树轮宽度资料的分析, 将去除树木本身的生长趋势后建立的标准年表与邻近的乌鞘岭气象站的气象观测值进行了相关分析, 结果表明:

( ) 研究区树木生长的主要限制性因子为降水量, 降水量多的年份, 对应树轮较宽; 降水量少的年份, 树轮较窄。

( ) 采用转换函数对腾格里沙漠南缘地区的年降水量进行了重建, 重建序列的方差解释量为41.7%(调整后为36.1%,  $F=7.4956, P<0.0001$ )。从重建序列可以看出: 近140年来, 腾格里沙漠南缘经历了明显的干湿变化, 出现1868~1876年和1932~1939年

两个湿润期, 以及1877~1894年(其中1887, 1888略为湿润)和1924~1932年两个干旱期, 1895~1923年, 1940~2000年期间有轻微的干湿变化, 但幅度不大。从曲线总的变化幅度与趋势来看, 近140年来, 本区降水没有明显的增减变化, 无明显变湿或变干的趋势。但是1940年以后, 降水波动出现幅度变小、频率增加的趋势。

( ) 谱分析表明, 近140年来的降水量重建序列具有显著的2.46~2.64 a以及较为显著的11.67 a的周期。这与目前公认的ENSO变化周期以及太阳黑子活动周期一致, 说明腾格里沙漠南缘的降水量受到全球大尺度气候变化的影响, 能够反映全球变化的区域响应。

( ) 沙漠是干旱气候的产物<sup>[28]</sup>, 沙漠的演化是对区域性特别是全球性气候变化的响应<sup>[29]</sup>。通常情况下, 沙漠的南侵北退与降雨量变化具有密切的关系, 干旱期固定、半固定沙丘活化, 沙漠向南推进, 而湿润期沙漠向北退缩。腾格里沙漠最近100多年来的高分辨率环境变化研究较少, 但是根据对沙漠演化的普遍认识, 中国北方地区20世纪20年代末至30年代初期土地退化加剧、流沙扩展, 30~60年代土地退化减弱、流沙固定<sup>[30]</sup>, 这与我们根据树木年轮恢复的腾格里沙漠南缘降水量的变化较为一致。因此, 可以初步推断, 腾格里沙漠在19世纪60年代末期至70年代中期北退, 流沙相对固定, 在19世纪70年代末至19世纪90年代中期南侵, 沙漠扩展。

致谢 中国科学院地理科学与资源研究所邵雪梅研究员对

本研究给予了精心的指导, 华南师范大学李森教授对本文进行了修改, 北京师范大学资源学院龚道溢教授提供了功率谱分析的程序, 北京师范大学云雅如同学参加了样品的处理, 北方工业大学赵爱斌同学参加了野外取样, 在此一并感谢. 本研究受国家自然科学基金项目(批准号: 40271114)、博士点基金(批准号: 20040027024)和国家重点基础研究发展规划(批准号: G2000048701)资助.

## 参 考 文 献

- 1 张虎才, 马玉贞, 李吉均, 等. 腾格里沙漠南缘全新世古气候变化初步研究. 科学通报, 1998, 43(12): 1252-1258
- 2 张虎才, 李吉均, 马玉贞, 等. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征. 沉积学报, 1997, 15(4): 152-158
- 3 刘志刚, 潘保田, 邬光剑, 等. 末次间冰期以来中国西北部沙漠边缘区夏季风变化初步研究. 中国沙漠, 2000, 20(4): 375-377
- 4 Fitts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976
- 5 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. 第四纪研究, 1997, 3: 265-271
- 6 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
- 7 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 等. 采用树轮稳定碳同位素重建贺兰山 1890 年以来夏季(6~8 月)气温. 中国科学, D 辑, 2002, 32(8): 667-674
- 8 马利民, 刘禹, 赵建夫. 交叉定年技术及其在高分辨率年代学中的应用. 地学前缘, 2003, 10(2): 351-355
- 9 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
- 10 康兴成, 张其花, Lisa J G, 等. 青海都兰过去 2000 年来的气候重建及其变迁. 地球科学进展, 2000, 15(2): 215-220
- 11 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
- 12 Marvin A. Stokes, Terah L. Smiley. Tree-ring Dating. Chicago and London: the University of Chicago Press, 1968
- 13 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. 第四纪研究, 1997, 1: 76-83
- 14 刘禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 树轮降水记录及东亚夏季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例. 地学前缘, 2001, 8(1): 91-97
- 15 Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in internal Alps. Tree-Ring Bulletin, 1993, 53: 1-11
- 16 Hughes M K, Leggett P, Milson S J, et al. Dendrochronology of oak in North Walse. Tree-Ring Bulletin, 1978, 38: 15-23
- 17 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度. 气象学报, 2000, 58(2): 223-233
- 18 袁林. 西北灾荒史. 兰州: 甘肃人民出版社, 1994. 68-72
- 19 中央气象局气象科学研究院主编. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981
- 20 古浪县志编纂委员会. 古浪县志. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 99-100
- 21 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2000. 222-245
- 22 李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候. 北京: 气象出版社, 2000
- 23 朱炳瑗, 李栋梁. ENSO 现象与甘肃省夏季降水. 高原气象, 1989, 8(1): 64-69
- 24 陈宝君, 钱君龙, 濮培民. ENSO 对天目山柳杉树轮同位素的影响. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 53-58
- 25 Rittenour T M, Brigham-Grette J, Mann M E. El Niño-Like Climate Teleconnections in New England During the Late Pleistocene. Science, 2000, 288(12): 1039-1042 [\[DOI\]](#)
- 26 Huber M, Caballero R. Eocene El Niño: Evidence for Robust Tropical Dynamics in the "Hothouse". Science, 2003, 299(7): 877-881 [\[DOI\]](#)
- 27 龚道溢, 王绍武. 1867 年以来的 ENSO 指数及变率. 气候通讯, 1998, 3: 11-17
- 28 高尚玉, 陈渭南, 靳鹤龄, 等. 全新世中国季风区西北缘沙漠演化初步研究. 中国科学, B 辑, 1993, 23(2): 202-208
- 29 阎满存, 董光荣, 李保生, 等. 腾格里沙漠东南缘沙漠演化的初步研究. 中国沙漠, 1998, 18(2): 111-117
- 30 高尚玉, 史培军, 哈斯, 等. 中国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 31-37

(2005-07-01 收稿, 2005-08-29 接受)