

## 青海湖流域圆柏年轮指示的近千年降水变化\*

时兴合<sup>1,2</sup>, 秦宁生<sup>1</sup>, 邵雪梅<sup>3</sup>, 汪青春<sup>2</sup>, 刘义花<sup>2</sup>

(1: 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

(2: 青海省气候中心, 西宁 810001)

(3: 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 根据采自青海湖流域天峻地区树木年轮样本, 建立了该地 1061a 树木年轮年表序列。通过响应函数计算得出, 该年表对青海湖区前一年年降水量反映敏感, 由其重建了该地的年降水量序列, 并应用交叉检验方法对校准方程进行了检验, 证明重建方程稳定, 重建的年降水变化比较可靠, 具有一定的代表性。在 10a 时间尺度上年降水经历了 11 个偏多和偏少时段, 其中 6(7)个显著的偏少(多)时段分别是 1001-1060、1131-1320、1411-1510、1691-1740、1811-1850 年和 1911-1940 年(961-1000、1061-1110、1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910 年和 1941-2000 年)。平均约 53a 发生一次突变, 13-14 世纪是年降水的多变时期, 12、17 和 20 世纪是年降水的相对稳定时段。

**关键词:** 树轮年表; 重建; 年降水量; 青海湖流域

## Precipitation change over the past 1000 years recorded in *Sabina Tibetica* Tree Rings in Lake Qinghai Basin

SHI Xinghe<sup>1,2</sup>, QIN Ningsheng<sup>1</sup>, SHAO Xuemei<sup>3</sup>, WANG Qingchun<sup>2</sup> & LIU Yihua<sup>2</sup>

(1: *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072, P.R.China*)

(2: *Climate Center of Qinghai, Xining 810001, P.R.China*)

(3: *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, P.R.China*)

**Abstract:** Tree-ring width chronologies of *Sabina Tibetica* were constructed based on tree-rings of 1061-year sampled in Tianjun county of Lake Qinghai Basin. The response function analysis showed that the chronologies were sensitive to the annual precipitation so that the paper reconstructed annual precipitation series. The cross-validation method was used to check in the stability of the calibration equation, and the result indicated that the equation was stable and the variation of reconstructed annual precipitation was dependable and representative. There were six years showing precipitation below normal stage, which were periods of 1001 to 1060, 1131 to 1320, 1411 to 1510, 1691 to 1740, 1811 to 1850 and 1911 to 1940. There were seven years that showed precipitation above normal stage, which were period of 961 to 1000, 1061 to 1110, 1321 to 1410, 1511 to 1650, 1741 to 1790, 1881 to 1910 and 1941 to 2000. The occurrence of abrupt precipitation was once a time every 53 years. Reconstructed precipitation series showed an unstable period from the 13th to 14th centuries, but stable periods in the 12th, 17th and 20th centuries.

**Keywords:** Tree-ring chronology; reconstruction; annual precipitation; Lake Qinghai Basin

青藏高原气候变化在全球变化中具有重要作用, 一方面高原气候及其生态环境和地表特征对全球变化非常敏感; 另一方面高原本身的变化反过来又作用于高原邻近地区, 甚至远离高原地区。研究表明<sup>[1-3]</sup>, 在几十年时间尺度上青藏高原往往表现为东亚地区气候变化的启动区, 因此对青藏高原气候变化的研究

---

\* 国家自然科学基金重大项目(40599424)、中国气象局成都高原气象研究所开放基金项目(LPM2008024)和中国气象局气候变化专项(CCSF2007-28)联合资助。2008-07-30 收稿; 2008-12-08 收修改稿。时兴合, 男, 1963 年生, 高级工程师; E-mail: shixinhe@tom.com.

具有十分重要的意义, 并受到高度重视<sup>[4-5]</sup>.

借助代用资料恢复历史气候要素的变化是古气候研究中广泛采用的方法. 姚檀栋等利用冰芯资料重建了高原上若干地点过去 2000a 以来气候变化的历史及变化特征<sup>[6-8]</sup>, 吕厚远等利用孢粉分析方法重建了高原中部 2.8Ma 来的植被变化<sup>[9]</sup>, 陈发虎等利用有机碳同位素、碳酸盐等湖泊沉积物讨论了青海鄂陵湖地区的气候环境演化过程<sup>[10-11]</sup>. 树木年轮资料具有年代准确、连续性强和分辨率高等特点, 长期以来在青藏高原环境变化研究中得到高度重视, 特别是近 10a 来, 在青藏高原上利用树轮资料进行气候变化重建研究取得了长足的进展, 秦宁生等利用治多等的树轮记录重建了青海南部高原近 500a 来的气候变化<sup>[12]</sup>, 勾小华等研究了阿尼玛卿山区最高最低温度的非对称变化<sup>[13]</sup>. 张其兵、邵雪梅、刘禹等利用祁连圆柏重建了柴达木盆地东部过去 1000-2000a 的降水变化<sup>[14-18]</sup>, 刘晓宏等探讨了祁连山中段过去 1000a 的温度变化<sup>[19-20]</sup>. 王苏民、冯松、周陆生等利用青海湖深水区重力岩芯的密集采样结果和青海湖周边地区的树轮年表资料重建了青海湖区近 600-800a 的气候变化历史<sup>[21-24]</sup>. 这些研究弥补了由于高原气象台站稀少、观测资料较短, 故用器测资料研究高原气候变化及成因受到限制的缺陷, 可使人们更好地了解高原气候变化全貌. 随着树木年轮气候学的迅速发展, 利用树木年轮资料, 获取某些气候要素的代用资料, 已经在全球范围内成为研究历史时期气候变化的重要途径之一<sup>[25-26]</sup>.

本文利用在青海湖流域天峻县获取的树轮宽度样本, 建立了树木年轮宽度的标准化序列, 在分析树轮宽度指数与气候要素的关系基础上, 重建了青海湖北部及西部(简称青海湖区, 下同)的年降水量序列, 并对其序列进行了气候诊断分析. 本工作为研究青海北部高原气候变化规律提供了基础资料, 具有科学意义, 并为当地政府决策部门制定应对气候变化影响的措施提供背景基础.

## 1 资料与方法

采样工作由中国科学院地理科学与资源研究所于2002年7月组织完成, 树轮样本采自青海湖流域布哈河上游天峻县快尔玛乡境内的原始森林(圆柏), 采样点海拔高度在3400-3900m之间, 树种以散生的原始祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)为主, 是青海省分布较高的森林群落<sup>[27]</sup>, 土壤类型是疏林草甸土, 处在年轻的发育阶段, 树木立地条件较差, 生长缓慢, 郁闭度较小, 树木受人类活动影响较少. 取样的具体地点为37°18'43"N, 98°23'56"E, 海拔高度为3500m左右. 树木为树龄较长的健康活树, 共采29棵树的58个树芯.

树轮样本的预处理过程以及轮宽量测是在中国科学院地理科学与资源研究所树轮实验室进行的. 首先按照树木年轮分析的基本程序进行了干燥(自然晾干)、固定、打磨和交叉定年, 以0.01mm精度的轮宽量测仪进行树木轮宽测量<sup>[28-29]</sup>. 对经过初步定年和树轮宽度量测的树轮样本用COFECHA程序进行了交叉定年的检验<sup>[30]</sup>, 以检查交叉定年和树轮宽度量测方面的主观错误, 判断各样本序列同主序列之间的相关, 剔除奇异点过多或与主序列之间相关较差的个别样本. 然后用ARSTAN程序建立树轮宽度指数年表<sup>[31]</sup>. 用100a步长的样条函数对每个样本的轮宽序列进行了树木生长趋势的拟合, 去除了树木由年龄造成的生长趋势和树木间相互竞争导致的低频变化, 最后得到标准化年表. 为了定量的评价该轮宽年表, 对去趋势后的指数序列进行了公共区间分析, 选择的公共区间为1401-1600年, 共200a, 计算了序列间相关系数、平均敏感度<sup>[32]</sup>、总体代表性等统计量<sup>[33]</sup>. 根据样本的子样本信号强度<sup>[30]</sup>, 并选择0.85为标准, 990年以来的轮宽指数变化较为可靠.

气候资料来自距离采样点最近的布哈河水文站和刚察气象站(纬度、经度和高度), 时段是1960-2002年, 气候要素包括平均气温、降水量资料. 为了分析树轮的径向生长与气候要素的关系, 采用了树轮气候学中常用的响应函数和相关函数<sup>[34]</sup>. 响应函数是将气候资料进行主成分转换后, 与树轮宽度指数进行回归, 其回归系数经变换, 使之与气候要素的变量相对应, 回归系数的绝对值越大, 说明该月份的气候状况对树木生长影响越大. 根据响应函数的计算值分析气候要素对树木径向生长的影响, 并可定量地评价影响的程度. 相关函数即计算气候要素的月值与树轮宽度指数序列的相关系数, 同样可为选择要重建的气候要素提供依据. 在计算响应函数和相关函数中, 选取了12个月的气候要素, 即上一年10月至当年9月.

重建方法采用的是简单的回归分析, 且利用交叉验证法对回归方程的稳定性进行了验证. 对重建的序列进行了趋势分析、周期分析和突变检验.

相关变量的计算方法如下:

信噪比:

$$SNR = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_1 + s_2}$$

其中,  $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$  分别为两段子序列 $x_1$ 和 $x_2$ 的平均值,  $s_1$ 和 $s_2$ 为对应序列的标准差<sup>[35]</sup>.

### 3 结果分析

#### 3.1 树轮指数序列及其对气候因子的响应

轮宽年表的基本概况和公共区间分析的结果(表1)可以看出, 其统计量与其他半干旱地区的树轮序列有相同的特征<sup>[16-20]</sup>, 既有较高平均敏感度、标准差、相关系数和总体代表性, 且能够代表采样点群体的变化. 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, 是用于该地气候变化研究的很好的代用资料.

树木生长在很大程度上受到气候因子的制约, 气候因子对树木生长贡献的大小一般通过响应函数的计算获得<sup>[16,34]</sup>, 利用响应函数计算得出, 采样点树轮宽度与4-6月的平均气温和5-6月降水量均有很好的相关关系(表2); 采样点树轮宽度与上一年年降水量和平均气温的相关系数值分别为0.42、-0.38. 平均气温、降水量的变化也可解释62.6%-71.3%的树轮宽度指数序列的方差, 其中年降水量、平均气温的组合所解释的方差较高.

研究区域4月平均气温、6月降水量和上一年年降水量与采样点的树轮宽度指数序列的相关最好, 这说明其时段的平均气温、降水量对树木的生长影响较大(表2). 秦宁生等的研究表明<sup>[12]</sup>, 温度、湿度对树木生长的影响较为复杂, 在生长季开始时温度的升高有利于延长生长季, 故与年轮宽度成正相关; 而在生长旺季, 温度往往不再是限制因子, 这时温度的升高会导致蒸散加剧, 在水分不足时往往限制了树木的生长, 故多表现为与年轮宽度的负相关. 在青海湖流域, 上一年年降水量较多, 当年气候比较湿润, 易林地带入冬后地表水分储存在土壤中, 翌年春季解冻后, 地面潮湿、水分溢出, 土壤水分比较充足, 对树木的生长有利.

表1 年表概况和公共区间分析(1401-1600年)序列的基本特征

Tab.1 Basic characteristic analysis of preface row year from general situation with public zone from 1401 to 1600a

代号	坡向	坡度	启始年	定年 总轮数	序列相 关系数	平均 敏感度	平均 标准差	缺轮 百分比	总体 代表性	1阶自相 关系数	树间相 关系数	树内相 关系数	第1主成 分方差 解释量
TJ	SSW	10°	943	27368	0.66	0.22	0.30	1.43	0.94	0.40	0.63	0.81	66.09

表2 各月气候要素与采样点树轮宽度指数之间的相关统计表

Tab.2 The Correlation between tree ring width index and climatic elements in every month

项目/时段	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
平均气温	0.24	-0.07	-0.15	-0.03	-0.23	-0.03	-0.39★
降水量	0.28	-0.25	-0.17	0.02	0.17	0.06	0.19
项目/时段	5月	6月	7月	8月	9月	上一年 1-12月	
平均气温	-0.30#	-0.36★	-0.13	-0.28	-0.27	-0.38★	
降水量	0.29#	0.48※	0.01	-0.09	-0.21	0.42※	

#, ★, ※分别表示通过了95%, 99%, 99.9%的置信度检验.

### 3.2 年降水量的重建

根据上述相关分析结果, 选用天峻( $TJ$ )标准化年表重建青海湖区年降水量序列, 重建时段为 942–2002年, 重建的回归方程为:

$$k_i = 273.77625 + 0.0090942TJ_{i-1}$$

式中,  $k_i$  为年降水量的第  $i$  年值,  $TJ_{i-1}$  为天峻树轮第  $i$  减 1 年的标准化值. 该方程的复相关系数为:  $R=0.42$ ,  $F$  检验值为:  $F=7.830$ , 通过了  $\alpha=0.001$  的显著性水平. 为了确定重建值的可靠性和合理性, 我们用交叉验证方法对重建序列与气候观测资料序列在 1960–2002 年时间段(43a)做了符号检验、一阶差符号检验、乘积平均值  $t$  以及误差缩减值  $RE$  检验. 计算结果为  $S1: 30(29: 31)$ 、 $S2: 29(28: 30)$ , 即显示符号一致的年份有 30a, 一阶差符号一致的年份有 29a, 均达到了  $\alpha=0.02$  的显著性水平, 乘积平均值为  $t=3.239$ , 而误差缩减值为  $RE=0.087$ , 由于  $RE>0$ , 说明重建序列与实测序列具有很好的相似性. 以上检验结果说明年降水量重建采用的回归方程比较稳定, 重建序列是合理可靠的. 图 1 为 1960–2002 年青海湖区年降水量重建值与实测值的对比曲线, 二者的相关系数为 0.34, 达到了  $\alpha=0.05$  的显著性水平. 图 2 是重建的青海湖区年降水量 1061a 的(942–2002 年)年际变化曲线.

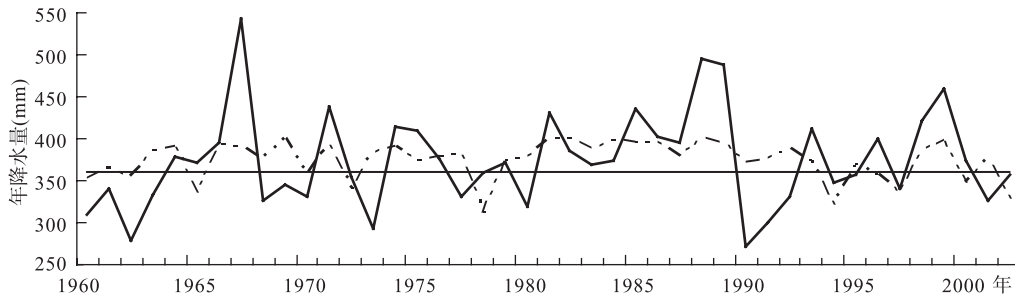


图 1 1960–2002 年青海湖区年降水量的重建值与实测值的变化曲线  
(实线为实测值, 虚线为重建值)

Fig. 1 The reconstructed and observed values of annual precipitation in Lake Qinghai area from 1960 to 2002a  
(Solid line denotes the observed value, dashed line denotes the reconstructed value)

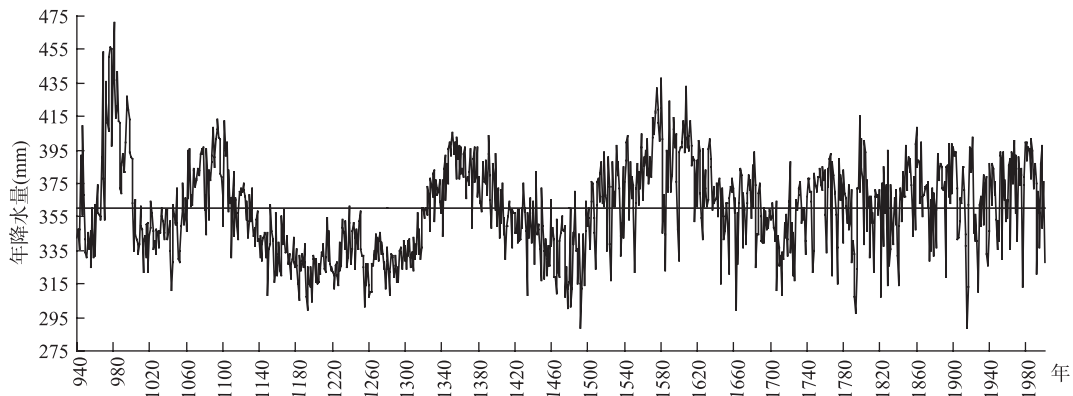


图 2 重建的 942–2002 年青海湖区年降水量的逐年变化曲线(实线: 年降水量, 直线: 多年平均值)

Fig. 2 The change of annual precipitation reconstructed in Lake Qinghai area from 942 to 2002a  
(Solid line for annual precipitation, straight line for multi-years mean)

### 3.3 年降水量的变化

在100a时间尺度上(图3a), 11、14、16-17、19-20(12-13、15、18)世纪青海湖区的年降水量呈偏多(少)的趋势, 16-17、19-20世纪年降水的偏多期持续两个世纪, 并且前者的强度偏大, 16-17、19-20世纪年降水偏多(少)的年数分别为81、68、68、66a(19、32、32、34a)。从曲线变化看, 未来100a平均年降水量减小, 转为偏少趋势。

在10a的时间尺度上(图3b), 青海湖区年降水量出现了11个偏多和11个偏少时段, 偏多(少)期较长的时段分别出现在961-1000、1061-1110、1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910年和1941-2000年(1001-1060、1131-1320、1411-1510、1691-1740、1811-1850年和1911-1940年)。其中, 1511-1650、1321-1410年年降水偏多期的持续时间分别达到了140a和90a, 其他时段年降水偏多的持续时间也达到了30-60a。年降水偏多(少)期持续20a的时段为1851-1870年和1671-1690年(1651-1670年); 年降水偏多(少)期10a的时段分别为1801-1810、1121-1130年(951-960、1111-1120、1791-1800年和1871-1880年)。可以看出, 10-20a年降水偏多的时段占据了劣势(4/11)。

用功率谱方法分析了重建序列的周期变化, 年降水量( $N=1061a$ ,  $M=N/4$ , 通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平)存在265、177、133、106、3、2a的显著周期。其中, 2-3a为较短的周期, 265a为较长的周期。其中, 177a周期与冯松依据青海湖深水区重力岩芯密集采样结果所重建的近600a水位变化所具有的180a左右的环境变化周期相一致<sup>[2]</sup>。

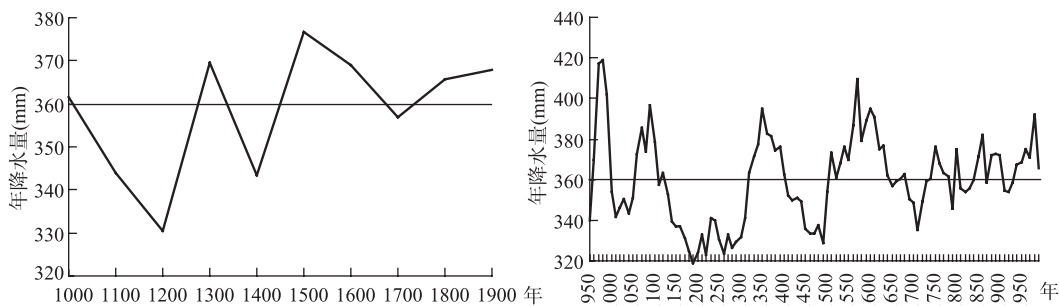


图3 年降水量的100a、10a时间尺度变化曲线

Fig.3 The curve of annual precipitation variety of 100a and 10a time scale

### 3.4 年降水量的突变检测

利用 Yamamoto 方法计算了年降水重建序列的信噪比<sup>[35]</sup>, 从表3信噪比的分析得出, 在10、15、20、25、30a时间尺度上信噪比大于1.0(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平, 下同)的突变年分别出现了20、9、5、7次和4次。在10a时间尺度上, 13-14世纪各出现4次, 10、18世纪各出现3次, 11、16世纪各出现2次, 15、19世纪各出现1次; 平均约53a发生一次突变, 13-14世纪是年降水的多变时期, 12、17世纪和20世纪是年降水的相对稳定时段。在20a时间尺度上, 11、14世纪各出现2次, 10世纪出现1次。在30a时间尺度上, 11世纪出现2次, 10、14世纪各出现1次。在10-30a时间尺度上突变均比较集中出现在972-973、997-1009、1055-1062、1307-1334年的年份范围之内。尤其是14世纪10-20年代出现的突变在10-30a的时间尺度上都比较明显。

### 3.5 年降水量变化的对比分析

周陆生的研究表明<sup>[24]</sup>, 青海湖区800a来大体上可分为3个相对湿润和4个相对干燥期, 主要干燥期为1176-1308、1433-1492、1582-1742、1913-1966年, 主要湿润期为1309-1432、1493-1581、1743-1912年。从1881年到1985年共105a间, 偏暖年77a, 偏冷年28a, 偏干年55a, 偏湿年50a。所以暖是百年来的主要气候特征, 其次是干略占优势。施雅风根据亚洲中部山区冰川进退变化和物质平衡资料以及山区湖泊资料得出结论<sup>[36-37]</sup>: “从上世纪末至今, 亚洲中部气候呈现着干暖化的趋势”; 敦德冰岩芯有关资料显

示<sup>[6]</sup>: “20 世纪为暖期, 其起始时间大约在 19 世纪末即已开始”。本次重建的青海湖区年降水明显的偏少(多)时段分别为 1001-1060、1131-1320、1411-1510、1691-1740、1811-1850 年和 1911-1940 年(961-1000、1061-1110、1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910 年和 1941-2000 年)。可以看出, 青海湖区千年来的年降水变化趋势与上述研究结论基本一致, 尤其是年降水偏多时段和偏少时段与上述 4 个相对干燥期和 3 个相对湿润出现的时间基本相一致。

表 3 年降水量序列两段信噪比>1.0 的突变年份

Tab.3 The abrupt years of two pieces of signal-to-noise ratio (>1.0) for annual precipitation series

10a 平均	15a 平均	20a 平均	25a 平均	30a 平均
967-969, 972, 986, 1000-1006, 1062, 1228, 1231, 1252-1256, 1264-1267, 1318-1320, 1343, 1346, 1348, 1498-1499, 1571-1573, 1582-1583, 1705-1706, 1708, 1796, 1846	965-973, 1000-1007, 1062, 1106, 1133-1135, 1253, 1314-1325, 1346-1348, 1618	965-972, 997-1007, 1059-1062, 1312-1325, 1343-1346	966-969, 972-973, 997-1009, 1055-1057, 1060-1062, 1310-1329, 1343-1344	972-973, 997-1009, 1055-1062, 1307-1334

王苏民等的分析表明<sup>[22]</sup>, 青海湖近 600a 来有 5 次湖泊相对扩张、水位上升、湖水趋于淡化的阶段, 它们分别发生在公元 1398、1528、1688、1778 年和 1898 年。青海湖岩芯很好反映了该区近 900a 来的气候环境演化<sup>[23]</sup>, 近 900a 来属于冷湿-暖干波动为主的气候演替类型, 在这段时间内, 共出现了 5 次冷湿期和 5 个温干、暖干期, 中世纪暖期、小冰期以及 20 世纪以来的升温在该沉积岩芯中得到很好地记录。小冰期的 3 个冷期所对应的 1410-1540、1610-1670 年和 1770-1850 年的 3 个湖水高盐度期表明该地区在小冰期的冷期, 气候较为干燥, 而最近几十年的高盐度和近几十年的气候暖干化是一致的。重建的青海湖区年降水中, 1411-1510、1811-1850 年的年降水偏少时段与高盐度期的干燥气候相一致, 1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910 年的年降水偏多时段与青海湖发生的 4 次(1398、1528、1778、1898 年)盐度淡化和水位扩张相一致。

李林等给出了柴达木盆地近 1100a 来的降水变化<sup>[38]</sup>, 即 900-1300、1420-1530、1630-1760 年和 1780-1870 年的 4 个干旱阶段和 1300-1420、1530-1630、1760-1780 年和 1870-2000 年的湿润阶段, 而较之于过去的 1100a, 1420-1530 年为最干旱的阶段, 1870-2000 年, 特别是最近的 1971-2000 年是最湿润的阶段。邵雪梅重建了德令哈地区近千年降水的变化<sup>[16]</sup>, 明显的少雨(多雨)时段为 1097-1206、1261-1317、1429-1519、1634-1741、1781-1839 年和 1916-1932 年(1045-1096、1207-1260、1318-1428、1520-1633、1742-1780、1840-1915 年和 1933-2001 年)。可以看出, 青海湖区年降水偏少时段除 1011-1060 年与柴达木盆地时间尺度较长的干旱或少雨阶段不一致外, 其他时段青海湖区年降水偏少期与柴达木盆地时间尺度较长的干旱或少雨阶段基本一致。

王振宇等的分析表明<sup>[39]</sup>, 自 1479 年以来, 青海北部地区夏季主要经历了 10 个相对干期和 11 个相对湿期, 其中持续时间较长的湿期有 3 段, 分别为 1544-1584、1667-1719、1936-1991 年, 干期的持续时间都较短。重建的青海湖区年降水在 10a 的时间尺度上, 年降水偏少、偏多的大多数时段与青海北部夏季 10 个相对干期和 11 个相对湿期基本吻合。

从以上的对比分析得出, 在 10a 的时间尺度上, 重建序列所指示的 6 个年降水偏少时段(1001-1060、1131-1320、1411-1510、1691-1740、1811-1850 年和 1911-1940 年)和 7 个偏多时段(961-1000、1061-1110、1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910 年和 1941-2000 年)在前人所做的一些科研成果中得到了印证, 也进一步说明, 重建的年降水序列是合理可靠的, 具有一定的区域代表性。

## 4 结论与讨论

(1)青海湖区4月平均气温、6月降水量和前一年年降水量对树木的生长影响较大,依据这些关系可以重建该地年降水量.从对比时间段符号一致性检验、一阶差符号检验、乘积平均值 $t$ 以及误差缩减值 $RE$ 等检验结果来看,年降水量重建采用的回归方程比较稳定,重建序列是合理可靠的,具有一定的区域代表性.

(2)在100a、10a的时间尺度上青海湖区分别出现了4、11个年降水偏少期和3、11个偏多期.在100a的时间尺度上,12-13世纪年降水的偏少期持续200a.在10a的时间尺度上,1131-1320、1411-1510、1001-1060、1691-1740、1811-1850、1911-1940年年降水的偏少期分别持续190、100、60、50、40、30a.

(3)年降水量序列存在265、177、133、106、3、2a的显著周期.平均约53a发生一次10a时间尺度的突变,13-14世纪是年降水的多变时期,12、17世纪和20世纪是年降水的相对稳定时段.

(4)重建序列所指示的6个年降水偏少时段(1001-1060、1131-1320、1411-1510、1691-1740、1811-1850年和1911-1940年)和7个偏多时段(961-1000、1061-1110、1321-1410、1511-1650、1741-1790、1881-1910年和1941-2000年)在相关的一些科技文献中得到了印证,也进一步说明,重建的年降水序列是合理可靠的.

## 5 参考文献

- [1] 汤懋苍,李存强,张 建.青藏高原及其四周的近代气候变化.高原气象,1988,7(1): 39-49.
- [2] 冯 松,汤懋苍,王冬梅.青藏高原是我国气候变化启动区的新证据.科学通报,1998,43(6): 633-636.
- [3] Liu Xiaodong, Chen Baode. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [4] Thompson LG, Yao T, Davis ME *et al.* Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, 276: 1821-1825.
- [5] 姚檀栋,刘晓东,王宁练.青藏高原地区的气候变化幅度问题.科学通报,2000,45(1): 98-106.
- [6] 姚檀栋,谢自楚,武筱聆.敦煌冰芯中的小冰期气候记录.中国科学(B辑),1990,11: 1196-1201.
- [7] 姚檀栋,秦大河,田立德等.青藏高原2ka来温度与降水变化——古里雅冰芯记录.中国科学(D辑),1996,26(4): 348-353.
- [8] 段克勤,王宁练,蒲健辰.达索普冰芯记录的印度季风突变.科学通报,2001,46(24): 2069-2073.
- [9] 吕厚远,王苏民,吴乃琴.青藏高原错鄂湖2.8Ma来的孢粉记录.中国科学(D辑),2001,31(增刊): 234-240.
- [10] 陈发虎.甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题.北京:科学出版社,1993: 21-33.
- [11] 黄 麒.青海湖沉积物的沉积速率及其古气候演变的初步研究.科学通报,1988,32(22): 1740-1744.
- [12] 秦宁生,邵雪梅,靳立亚等.青海南部高原圆柏年轮指示的近500年来气候变化.科学通报,2003,48(19): 2068-2072.
- [13] 勾晓华,杨梅学,彭剑峰等.树轮记录的阿尼玛卿山区过去830年夏半年最高温变化.第四纪研究,2006,26(6): 991-998.
- [14] Sheppard PR, Holmes RL, Graumlich LJ. The "many fragment curse": A special case of the segment length curse. *Tree Ring Bulletin*, 1997, 54: 1-9.
- [15] Zhang Qibin, Cheng Guodong, Yao Tandong *et al.* A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letter*, 2004, 30(14): 1739-1742.
- [16] 邵雪梅,黄 磊,刘洪滨等.树轮记录的青海德令哈地区近千年降水变化.中国科学(D辑),2004,34(2): 145-153.
- [17] 刘 禹,蔡秋芳,刘征宇等.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),2006,36(5): 461-471.
- [18] Yin Zhiyong, Shao Xuemei, Qin Ningsheng *et al.* Reconstruction of a 1436-year soil moisture and vegetation water use history based on tree-ring widths from Qilian junipers in northeastern Qaidam Basin, northwestern China. *International Journal of Climatology*, 2007, 18: 1656-1673.
- [19] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 1729-1742.

- [20] 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.
- [21] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. 科学通报, 1999, **44**(6): 579-587.
- [22] 王苏民, 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段: 以青海湖、岱海为例. 科学通报, 1991, **36**(1): 54-56.
- [23] 冯 松, 汤懋苍, 周陆生. 青海湖近 600 年的水位变化. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 22-26.
- [24] 周陆生, 汪青春. 青海湖地区历史时期以来的气候变化. 青海环境, 1996, **6**(4): 184-191.
- [25] Cook ER, Woodhouse CA, Eakin CM *et al.* Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 2004, **306**(5698): 1015-1018.
- [26] Esper J, Cook E, Schweingruber F. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies and the reconstruction of past temperature variability. *Science*, 2002, **295**: 2250-2253.
- [27] The Editing Committee of Forest. Forest in Qinghai. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 240-245.
- [28] Stokes MA, Smiley TL. An introduction to tree ring dating. Chicago: the University of Chicago Press, 1968: 124-139.
- [29] Fritts HC. Tree rings and Climate. London: Academic Press, 1976: 31-39.
- [30] Grissino-Mayer HD. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree Ring Research*, 2001, **57**(2): 205-221.
- [31] Cook ER, 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.
- [32] Wigley TML, Briffa KR, Jones PD. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23**: 201-213.
- [33] Johnson RA, Wichern DW. Applied multivariate statistical analysis. New Jersey: Prentice-hall, 1982: 76-89.
- [34] 吴祥定, 邵雪梅. 中国树木年轮气候学研究动态与展望. 地球科学进展, 1993, **8**(6): 31-35.
- [35] 魏凤英. 现代气候诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 60-63.
- [36] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望. 地理学报, 1990, **45**(1): 1-13.
- [37] 施雅风, 姚檀栋, 康兴成等. 近2000年古里雅冰芯年代际气候变化及其与中国东部资料的比较. 中国科学(D辑), 1999, **29**(增刊): 79-86.
- [38] 李 林, 王振宇, 秦宁生等. 近1100年来柴达木盆地干湿气候演变特征及趋势预测. 高原气象, 2005, **24**(3): 326-330.
- [39] 王振宇, 周陆生. 青海北部 1165-1981 年夏季降水的演变特征. 见: 谢金南主编. 中国西北干旱气候变化与预测研究(第三卷). 北京: 气象出版社, 2000: 79-84.