

青海德令哈地区千年来降水量的突变分析

黄磊¹, 邵雪梅^{1,2}, 刘洪滨³, 梁尔源², 王丽丽^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

3. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

摘要: 根据青海省德令哈地区海拔 3500~4000 m 左右的祁连圆柏树木年轮资料重建的该地区公元 1000 年以来的年降水量变化, 使用滑动 t 检验和滑动 F 检验等气候突变检测方法对千年降水量 30 年气候均值和均方差的突变进行了分析, 探讨了气候突变的可能原因。研究发现, 德令哈地区千年来降水量的 30 年气候均值和均方差发生了多次显著突变, 其中均值突变 14 次、均方差突变 8 次; 太阳活动极小期内的降水量与其前后同时段内降水量的均值相比存在显著差异; 降水量突变发生的时间和方向与太阳活动异常较为一致, 因此推测太阳活动的长期变化是导致德令哈降水量发生突变的主要原因。近一个多世纪以来, 德令哈地区的降水量突变与东亚夏季风的年代际变化有密切联系。德令哈降水量发生突变的时间与我国东部地区相比具有一定的超前性, 对预测降水量的长期变化趋势具有重要的指示作用。

关键词: 青海; 气候变化; 降水量; 突变; 太阳活动

1 引言

青藏高原以其特殊的地理位置和对我国及东亚乃至北半球天气气候的重要影响, 使其成为气候变化研究的热点地区。最近的研究表明, 青藏高原近 30 年来的温度和降水量都出现了增加的趋势^[1], 同时我国西北地区的气候也存在向暖湿方向转变的趋势^[2]。青藏高原的气象记录只有 50 年左右的长度, 器测资料长度的限制使得它所描绘的气候变化特征只是气候系统行为的一个短暂阶段。在当前全球变暖的背景下, 包括青藏高原和西北地区在内的我国西部地区气候的暖湿化是气候状态的突变还是一个渐进的过程? 长时间尺度背景下的气候变化是由什么原因造成的? 要想研究这些问题, 需要借助于树轮、冰芯等高分辨率的古气候代用资料, 在更长的时间尺度上分析气候变化的规律和突变特征, 揭示气候突变的可能原因^[3]。本文利用根据树木年轮资料重建的青海德令哈地区公元 1000 年以来的年降水量记录^[4], 使用气候突变检测方法对千年来德令哈地区的气候突变进行分析, 并进一步探讨气候突变的可能原因, 为认识过去气候变化规律、预测未来气候变化趋势提供参考。

2 资料与方法

德令哈地区位于青海省柴达木盆地的东北边缘、青海湖的西面。柴达木盆地四周为高山环绕, 德令哈所在的盆地东部地区海拔在 2900~3000 m 左右, 自然植被主要为干旱荒漠草原, 洪积扇、洪积台地、湖积平原广泛发育, 寒冷干燥是这一地区的主要气候特

收稿日期: 2005-12-22; 修订日期: 2006-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371118); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (ZCX3-SW-321) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40371118; Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences, No.KZCX3-SW-321]

作者简介: 黄磊 (1976-), 男, 山东人, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: huangl@igsnr.ac.cn

征。在盆地东部海拔 3500 m 到 4000 m 左右的中山地带的阳坡和半阴坡分布着祁连圆柏的天然林^[4]，由于气候寒冷干旱，树木生长缓慢，不易倒伏，树芯不易腐烂，千年以上的古树得以存活至今。根据在德令哈地区采集的 7 个样地的树木年轮资料，重建了德令哈地区的千年降水量变化^[4]，重建序列能够解释器测降水量变化方差的 63%；通过对重建降水量与祁连山敦德冰川累积量和微粒含量的对比发现，近几百年内，三者在低频变化上具有较好的一致性。由于树轮资料定年的准确度高，因此可以说重建的千年降水量变化是比较可靠的，有一定的区域代表性。

在气候学研究中，一般以 30 年平均值作为气候标准来代表一个地区的气候状况，但这个 30 年平均的“气候均值”也是随时间而发生变化的。长期气候变化既可以发生在数十年的气候平均值上，也可以出现在数十年中的气候变率上，即气候要素均方差的变化上。因此，气候均值和均方差的变化对于气候变化规律与气候变率的研究具有重要意义。本文对德令哈地区千年来降水量 30 年气候均值和均方差的突变进行分析，采用滑动 t 检验法对气候均值的变化、采用滑动 F 检验方法对均方差的突变分别进行置信度水平检验^[5,6]。滑动 t 检验的方法是把气候序列中的两段子序列均值有无显著差异看为来自两个总体均值有无显著差异的问题来进行检验，如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平，可以认为均值发生了显著变化，有突变发生。滑动 F 检验方法用来检验两组样本均方差的差异是否显著，计算过程与滑动 t 检验相似。本文在计算时取子序列的长度为 30 年，采用连续移动基准点的方法进行检验。

3 结果与分析

3.1 千年降水量气候突变的检测

从千年来不同时期内降水量的 30 年气候平均值和均方差的变化可见 (图 1)，近千年来最显著的两个干旱期分别发生在 15 世纪下半叶和 18 世纪初，最明显的湿润期出现在 16 世纪下半叶，20 世纪中期以来降水量明显增加，其 30 年平均的降水量仅次于 16 世纪下半叶。降水均方差最大的时期则分别出现在 16 世纪末和 18 世纪末，其中 1573~1602 年降水量均方差为 46.3 mm，为千年来的最大值；均方差最小的时期出现在 11 世纪。

对千年来重建降水量的 30 年平均值变化进行了滑动 t 检验 (图 2)，表明千年来 30 年

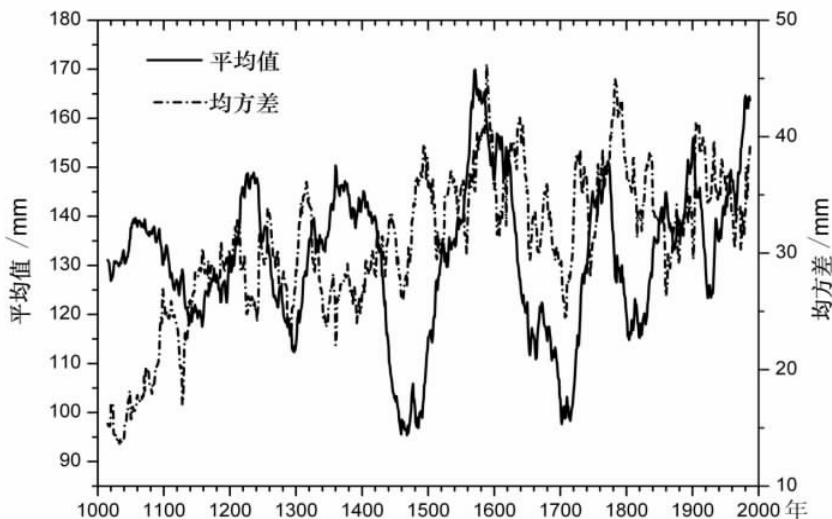


图 1 千年降水量 30 年气候平均值和均方差的变化

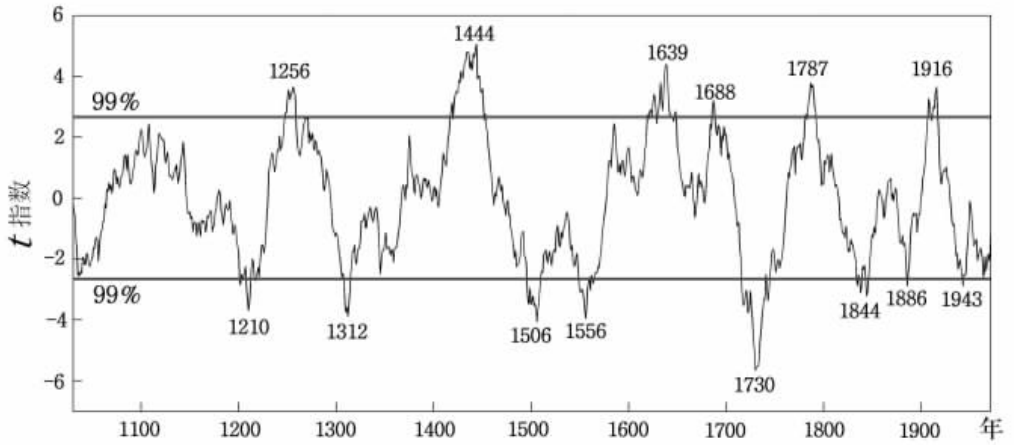


图 2 千年降水量 30 年平均值变化的滑动 t 检验

Fig. 2 Smoothing t-test of abrupt changes in 30-year climatic average values of precipitation for the last 1000 years

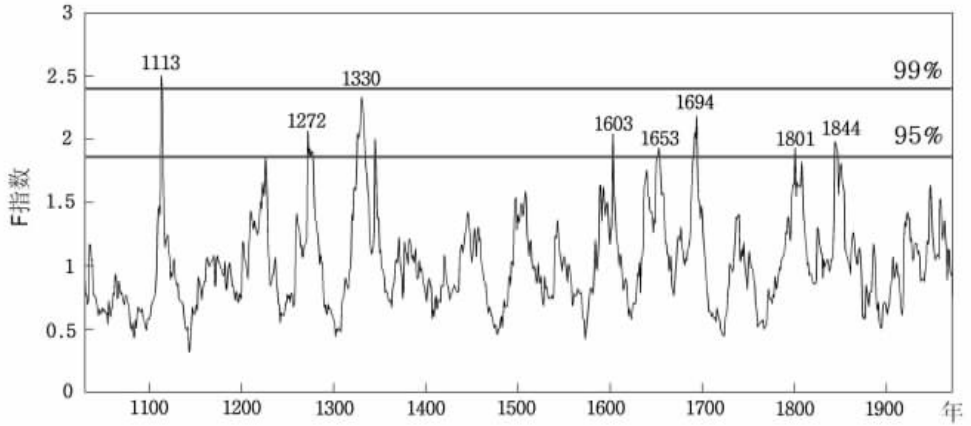


图 3 千年降水量 30 年均方差突变的滑动 F 检验

Fig. 3 Smoothing F-test of abrupt changes in 30-year standard deviations of precipitation for the last 1000 years

尺度上的气候均值在 99% 的显著性水平上发生了 14 次突变，其中负突变 6 次，正突变 8 次。最显著的负突变发生在 15 世纪中期 (1444 年前后)，突变之后降水量均值迅速减少；最显著的正突变发生在 18 世纪前期 (1730 年前后)，突变之后降水量均值迅速增加。15 世纪之前共发生了 3 次突变 (公元 1210、1256 和 1312 年左右)，16 世纪内出现了两次正突变，而 17 世纪内发生了两次负突变。18 世纪内公元 1787 年前后的负突变也非常显著，突变后降水量持续降低，直到 19 世纪中后期才出现了两次正突变 (1844 和 1886 年前后)。20 世纪内德令哈降水量在 1916 年前后发生了突变，降水量降低，1943 年前后再次发生突变，降水量的均值增加。

对千年降水量进行 30 年均方差突变的滑动 F 检验结果表明 (图 3)，千年来 30 年降水量均方差在 95% 的显著性水平上出现了 8 次突变，其中最显著的突变发生在 12 世纪初 (公元 1113 年前后)，达到了 99% 的显著性水平。15 和 16 世纪内没有发生一次均方差突变，而 17 世纪内发生了 3 次。18~20 世纪内共出现了两次均方差突变，且都出现在 19 世纪上半叶 (公元 1801 和 1844 年)。

对比图 2 和图 3 可以发现，均方差突变的出现时期和均值突变并不一致，但在湿润

期过后, 均方差常常会发生较大的变化, 而在干旱期内降水量均方差的突变并不明显。如 16 世纪末期的湿润期之后, 17 世纪内发生了 3 次均方差突变; 而在最干旱的 16 和 18 世纪则没有发生一次均方差突变。

3.2 降水量突变的可能原因

本文检测到的德令哈地区千年来显著的气候突变事件, 在其他的研究中也大多被检测到。以 15 世纪之前发生的气候突变为例, 很多研究都发现在 1230 年前后发生过一次显著突变, 而且这次突变并非局地性现象, 如张丕远等^[7]对中国 47 个地点的近 2000 年来的历史气候资料分析发现, 1230~1260 年发生了中国近 2000 年来最为明显的气候突变, 中国现代季风气候的结构由此开始。本文的研究也表明, 德令哈地区的降水量在 13 世纪之前变化较小, 自 13 世纪之后变化的幅度增大。

德令哈降水量在 17 世纪中期发生的突变是千年来较为显著的, 17 世纪的这次显著突变在我国其他地区也都被发现, 揭示了这一时期气候状态在大尺度上的不稳定性。黄河中游 500 多年的旱涝历史揭示了在 1645 年发生了一次由涝转旱的突变^[8]; 在我国东部地区 1000 年的干湿变化中也发现东部 6 个区中有 5 个区域在 1644 年前后发生了突变^[9]; 对近 2000 年来关中地区和海河流域的旱涝变化历史的研究也发现关中地区在 1644 年、海河流域在 1643 年发生了突变^[10]; 近 530 年来北方旱涝演变历史表明, 在 17 世纪中期, 北方的 4 个地区 (东北区、华北北区、华北南区和西北区) 一致出现从偏旱到偏涝的跃变, 其中华北北区和华北南区的跃变都发生在 1643/1644 年^[11]。通过以上分析可见, 在 1643/1644 年前后发生了一次较为显著的旱涝突变, 严中伟等^[10]将这种大范围的气候突变称为非局地性跃变事件。

德令哈降水量在 17 世纪发生突变的时期恰好与太阳活动进入 Maunder 极小期较为一致, 而在 1715 年太阳活动 Maunder 极小期结束之后, 降水量开始迅速上升。由图 2 可以看到, 30 年降水量的均值在 1715 年前后已经发生了显著突变, 而在 1730 年前后突变达到最大。

对 1645~1715 年 Maunder 极小期的降水量与这一时期前后各 71 年的降水量变化进行对比, 结果发现 1574~1644 年降水量的平均值为 151.1 mm, 1645~1715 年为 110.0 mm, 而 1716~1786 年降水量均值为 136.1 mm。t 检验的结果表明, 1645 年前后的降水量均值在 99% 的显著性水平上发生了突变, 而 1715 年前后的降水量均值突变的显著性水平也达到了 99%。在太阳活动 Maunder 极小期内, 德令哈地区的降水量均值与此时期前后同一时段的降水量相比存在显著差异, 说明太阳活动的变化可能导致了德令哈降水量发生突变。

千年来其他时期的降水量突变是否也与太阳活动的变化有关? 我们分别对千年以来的 5 个太阳活动极小期期间的降水量与其前后时期同样长度时间内的降水量进行了对比 (表 1)。

由表 1 可以看出, 太阳活动 Spoerer 极小期和 Maunder 极小期内的降水量与其前后同时段内降水量的变化相比, 均在 99% 的置信度水平上存在显著差异。Wolf 和 Dalton 极小期内降水量的变化至少在 95% 的置信度水平上存在显著差异, 而 Oort 最小期内的降水量与之后同时期的降水量变化差异不显著 (之前同时期无降水量资料以供对比)。

为了进一步分析德令哈地区降水量突变与太阳活动的关系, 我们将千年来的显著降水突变的最大突变年份、显著突变区间、突变方向与太阳活动的异常进行对比 (表 2), 可以看到, 不仅大多数的突变时间与太阳活动的异常发生时期相一致, 而且降水量的均值突变方向与太阳活动强弱的变化方向也较为一致, 降水量均值的显著降低与太阳活动极小期的开始 (太阳活动的减弱) 相联系, 而降水量均值的显著增加与太阳活动极小期的结束 (太阳活动的增强) 相联系 (表 2)。总体看来, 太阳活动的变化与德令哈地区千年降水

表 1 太阳活动极小期与德令哈降水量变化
Tab. 1 Solar minima and precipitation change in Delingha

太阳活动极小期	极小期之前平均降水量 (mm) (t检验置信度水平)	极小期期间平均降水量	极小期之后平均降水量 (mm) (t检验置信度水平)
Oort		132.3	136.8 (<95%)
Wolf	137.2 (95%)	125.9	140.9 (99%)
Spoerer	140.8 (99%)	112.2	149.8 (99%)
Maunder	151.1 (99%)	110.0	136.1 (99%)
Dalton	143.8 (99%)	121.7	135.4 (95%)

表 2 德令哈降水量 30 年气候均值突变与太阳活动
Tab. 2 Abrupt changes in 30-year climatic average precipitation of Delingha and solar activity

最大均值突变年份	突变区间 (99%置信度水平)	突变方向	太阳活动极小期开始年份	太阳活动极小期结束年份
1210	1208-1212	上升		
1256	1248-1258	下降	1280 (Wolf)	
1312	1309-1314	上升		1340 (Wolf)
1444	1421-1451	下降	1420 (Spoerer)	
1506	1496-1509	上升		1530 (Spoerer)
1556	1549-1559	上升		
1639	1630-1643	下降	1645 (Maunder)	
1688	1686-1688	下降		
1730	1716-1740	上升		1715 (Maunder)
1787	1784-1792	下降	1780 (Dalton)	
1844	1843-1846	上升		1829 (Dalton)
1886	1886	上升	1875 (Modern)	
1916	1908-1910, 1912-1917	下降		
1943	1943	上升		1950 (Modern)

量的突变存在密切联系, 因此推测太阳活动的长期变化是导致德令哈降水量发生突变的重要原因。

过去一个多世纪以来的德令哈地区 30 年平均降水量在 1886 年、1916 年和 1943 年发生了显著突变, 另外在 1964 年前后也发生了一次突变, 但没有达到 99% 的显著性水平 (t 值为 -2.60, 检验临界值为 -2.66)。杨文峰等^[12]对陕西西安和宝鸡 1780~1989 年共 210 年旱涝等级序列资料进行突变分析时发现, 西安、宝鸡两地旱涝气候跃变非常一致, 1883 年前后由旱转涝, 1915 年前后 (含 1916 年) 由涝转旱, 1935 年前后又由旱转涝, 关中地区 1883 年、1915 年前后的旱涝气候跃变点也与严中伟等^[10]的计算结果基本一致。

德令哈地区近一个多世纪以来的降水量突变与东亚夏季风的长期变化有密切联系。将德令哈重建降水量与郭其蕴等^[13]建立的 1873~2000 年共 128 年的夏季风强度指数进行相关分析, 发现东亚夏季风强度指数与德令哈降水量呈显著负相关, 年际变化上的相关系数为 -0.260 ($p < 0.01$)。如果采用 30 年气候平均作为一个时间单位, 分别计算 1881~1910 年、1911~1940 年、1941~1970 年以及 1971~2000 年的夏季风指数和德令哈降水量的 30 年均值, 结果表明夏季风强度指数平均值分别为 0.92、1.17、1.12 和 0.72, 降水量均值分别为 148.7 mm、126.0 mm、146.8 mm 和 164.5 mm。可见, 1971~2000 年夏季风强度最弱, 这 30 年内德令哈平均降水量最高; 而 1911~1940 年夏季风最强, 平均降水量最低, 说明在年代际变化上二者的变化趋势相反。东亚夏季风在 19 世纪末、20 世纪 40 年代和 80~90 年代较弱, 在 20 世纪 20 年代和 50~60 年代相对较强; 这与德令哈地区降水量在 1886 年由干到湿的突变、1916 年由湿到干的突变、1943 年由干到湿的突变以及 1964 年由干到湿的突变存在较好的对应关系。

另外, 德令哈降水量突变的时间比我国东部地区要早, 对我国东部地区气候变化具

有指示性作用。如在 17 世纪中期发生的显著突变, 我国东部地区基本上发生在 1644 年前后, 祁连山中部地区树木年轮记录的旱涝突变发生在 1641 年^[14], 而德令哈降水突变发生在 1639 年前后, 并且超过 99% 置信度水平的突变在 1630 年就开始出现, 到 1643 年已经结束(表 2)。又如发生在 20 世纪 60 年代中期的气候突变, 大量的研究都表明突变发生在 1966/1967 年左右^[15], 德令哈降水量超过 95% 显著性水平的突变出现在 1964 年, 比其他地区也早两年左右。

4 结论

根据青海省德令哈地区海拔 3500~4000 m 左右的祁连圆柏树木年轮资料重建的该地区公元 1000 年以来的年降水量变化, 本文使用滑动 t 检验和滑动 F 检验等气候突变检测方法对千年降水量 30 年气候均值和均方差的突变进行了分析, 并探讨了气候突变的可能原因, 研究发现:

(1) 德令哈地区千年来降水量的 30 年气候均值和均方差发生了多次显著突变, 其中均值突变发生了 14 次, 均方差突变出现了 8 次; 这些突变点在其他降水序列中也大多被检测到。

(2) 太阳活动极小期内的降水量与其前后同时段内降水量的均值相比存在显著差异, 降水量突变发生的时间和方向与太阳活动异常较为一致, 说明太阳活动的长期变化是导致德令哈降水量发生突变的主要原因。

(3) 近一个多世纪以来, 德令哈地区的降水量突变与东亚夏季风的年代际变化存在密切联系。

(4) 德令哈降水量发生突变的时间与我国东部地区相比具有一定的超前性, 对预测东部地区降水量的长期变化趋势具有重要的指示作用。

参考文献 (References)

- [1] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.]
- [2] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 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(3): 219-226.]
- [3] Bradley R S. Past global changes and their significance for the future. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 391-402.
- [4] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(7): 939-949.
- [5] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 16(4): 482-493. [符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.]
- [6] Fu Congbin. Studies on the observed abrupt climatic change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1994, 18(3): 373-384. [符淙斌. 气候突变现象的研究. *大气科学*, 1994, 18(3): 373-384.]
- [7] Zhang Peiyuan, Ge Quansheng, Zhang Shihuang et al. The modes and abrupt changes of climate in China during recent 2000 years. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(1): 12-20. [张丕远, 葛全胜, 张时煌等. 2000 年来我国旱涝气候演化的阶段性和突变. *第四纪研究*, 1997, 17(1): 12-20.]
- [8] Yu Shuqiu, Lin Xuechun. Abrupt change of drought/flood for the last 522 years in the middle reaches of Yellow River. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1996, 7(1): 89-95. [于淑秋, 林学椿. 黄河中游地区近 522 年旱涝突变. *应用气象学报*, 1996, 7(1): 89-95.]
- [9] Zhang De'er, Liu Chuanzhi, Jiang Jianmin. Reconstruction of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in East China. *Quaternary Research*, 1997, 17(1): 1-11. [张德二, 刘传志, 江剑民. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. *第四纪研究*, 1997, 17(1): 1-11.]
- [10] Yan Zhongwei, Li Zhaoyuan, Wang Xiaochun. An analysis of decade-to-century climate jumps in history. *Chinese*

Journal of Atmospheric Sciences, 1993, 17(6): 663-672. [严中伟, 李兆元, 王晓春. 历史上 10 年 -100 年尺度气候跃变的分析. 大气科学, 1993, 17(6): 663-672.]

- [11] Zhu Yafen. The regional division of dryness/wetness over eastern China and variations of dryness/wetness in northern China during the last 530 years. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(suppl.): 100-107. [朱亚芬. 530 年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变. 地理学报, 2003, 58(增刊): 100-107.]
- [12] Yang Wenfeng, Li Zhaoyuan, Li Xingmin. A new method of analyzing climate jump and its application. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1997, 8(1): 119-123. [杨文峰, 李兆元, 李星敏. 一种新的气候跃变分析方法及其应用. 应用气象学报, 1997, 8(1): 119-123.]
- [13] Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei et al. Studies on the variations of East Asian summer monsoon during AD 1873-2000. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(2): 206-215. [郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅等. 1873-2000 年东亚夏季风变化的研究. 大气科学, 2004, 28(2): 206-215.]
- [14] Kang Xingcheng, Cheng Guodong, Chen Fahu et al. A record of drought and flood Series by tree-ring data in the middle section of Qilian Mountain since AD.904. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(5): 518-525. [康兴成, 程国栋, 陈发虎等. 祁连山中中部公元 904 年以来树木年轮记录的旱涝变化. 冰川冻土, 2003, 25(5): 518-525.]
- [15] Song Yan, Ji Jinjun. The interdecadal abrupt change of the African-Asian summer monsoon in the 1960s. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(2): 200-208. [宋燕, 季劲均. 60 年代亚非夏季风十年尺度的突变. 大气科学, 2001, 25(2): 200-208.]

Abrupt Changes of Precipitation in Delingha Region, Qinghai for the Last 1000 Years

HUANG Lei¹, SHAO Xuemei^{1,2}, LIU Hongbin³, LIANG Eryuan², WANG Lili^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China;

3. Laboratory for Climate Study, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the tree ring width chronologies developed in Delingha region, Qinghai province, the annual precipitation variations for the last 1000 years has been reconstructed recently. In this study, we investigate the abrupt changes of precipitation for the last 1000 years. Smoothing t-test and smoothing F-test methods were used to search for possible abrupt changes in the mean value and the standard deviations of 30-year climatic average precipitation. Significant abrupt changes were found during the last 1000 years and we suggested that solar activity played an important role in influencing these changes. It is evident that the precipitation decreased significantly during the periods of the Wolf, Spoerer, Maunder and Dalton minima of solar activity, and the t-test verified the existence of statistically significant differences within these periods. The time and the direction of abrupt changes of precipitation coincided well with the abnormal variations of solar activity. The abrupt changes of precipitation in Delingha may link with the interdecadal changes of East Asian Summer Monsoon for the last century. The time of abrupt changes in Delingha was ahead the time of abrupt changes in eastern China, which may be an important indicator for long-term change forecast of precipitation.

Key words: Qinghai; climate change; precipitation; abrupt change; solar activity