

青海高原地区近250 a来年平均气温 变化及突变分析

乜国妍^{1,2}, 秦宁生³, 汪青春³, 刘青春⁴, 时兴合³

(1. 青海省气象科技创新基地, 青海 西宁 810001; 2. 青海省海南州气象局, 青海 海南 813000;
3. 青海省气候中心, 青海 西宁 810001; 4. 青海省培训中心, 青海 西宁 810001)

摘要:用多条树轮重建的青海高原近250 a平均气温序列, 利用线性趋势、小波变换分析和突变检测等方法对近250 a青海高原年平均气温的年际变化及突变特征进行了综合分析, 结果表明: 250多a来青海高原年平均气温波动明显, 30 a滑动平均表现出1779~1811年和1934~2006年年平均气温偏高, 其中年平均气温最高出现在1998年为1.3℃, 1741~1778年和1812~1933年年平均气温偏低, 其中年平均气温最低出现在1823年为-1.5℃, 年气温总体呈上升趋势; 在20 a以上相对大尺度上, 年平均气温冷、暖交替的特征明显, 经历了7个冷、暖交替阶段, 在2~3 a, 28 a左右, 48 a和110 a时间尺度上的周期变化都比较明显。

关键词:青海高原; 气温; 小波分析; 突变

中图分类号: P423

文献标识码: A

引言

树木年轮以分辨率高、记录连续性好和重建精度高等优势, 成为全球气候研究中获取过去气候环境演变记录的重要方法之一^[1-3]。青海高原气温研究结果主要是利用青藏高原部分地区近40 a的观测资料得到的, 对更长时间尺度青海高原气温变化的了解则需要利用代用气候资料来分析。汪青春、秦宁生等^[3]利用多条树轮资料重建了青海高原近250 a年平均气温序列, 分析表明: 高原上树轮年表与气温存在较好的对应关系, 气温是年轮主要控制因子之一, 年表更多地反映了最低气温的变化。靳立亚、秦宁生等^[4]对青海南部高原近450 a来春季最高气温序列及其时变特征进行分析, 结果显示, 青海南部高原地区春季最高气温变化存在较明显的31~54 a低频和2~4 a高频准周期波动特征, 最高气温在冷暖期的转换过程中存在较明显突变现象。李林等^[5]对青藏高原气温变化及其异常类型的研究结果表明温度年际波动呈现出明显的上升趋势, 并在20世纪80年代中后期发生过突变。本文利用

已重建好的青海高原近250 a年平均气温序列, 用小波分析方法和滑动 t 检验法对青海高原气候突变和气候背景作进一步分析。

1 资料来源

选用汪青春、秦宁生等^[3]利用青海高原德令—乌兰、祁连、班玛、青海南部高原西部的治多和曲麻莱4个区域内6条树轮资料重建的青海高原1735~1985年年平均气温序列资料。

2 青海高原地区年平均气温变化趋势及预测

图1为1735~2006年以来青海高原年平均气温年际变化曲线(1953年起为实际值)。青海高原地区年平均气温1735~2006年经历了从高到低、从低到高的变化过程, 类似正弦波的变化过程, 1823~1860年间波动幅度相对较小, 而1861~2006年间波动幅度较大, 表明这期间青海高原年平均气温变化较大。从1735~2006年的272 a间青海高原最

收稿日期: 2007-04-17; 改回日期: 2004-05-18

基金项目: 中国气象局气候变化专项(ccsf 2007-28)及国家自然科学基金项目(40665002)资助

作者简介: 乜国妍(1969-), 女, 青海贵德人, 工程师, 主要从事短期天气预报及服务工作。E-mail: neiguoyan@163.com

冷的一年出现在 1823 年,年平均气温为 -1.5°C ,次冷年出现在 1860 年,年平均气温为 -1.3°C 。最暖的一年出现在 1998 年,年平均气温为 1.3°C ,次暖年出现在 2006 年,年平均气温为 1.2°C 。由此看出,青海高原最冷的年份出现在 19 世纪,最暖的年份出现在 20 世纪末到 21 世纪初。为了正确描述年平均气温的长期变化特征,根据世界气象组织规定,以 30 a 的平均值作为一个时期的标准气候值,对青海高原年平均气温序列作 30 a 滑动平均,滤去高频

变化后,如果以连续 30 a 滑动平均值在多年平均值 (-0.15°C) 以上时段为暖期,以下时段为冷期,以冷暖期过渡阶段气温年际变化最大的年份作为某时段的起止年份,同时要求 1 个冷暖时段不少于 30 a,则从 1735 ~ 2006 年可以分为 2 个偏暖期和 2 个偏冷期,其中 2 个暖期分别为:1779 ~ 1811 年,1934 ~ 2006 年,20 世纪 30 ~ 40 年代青海高原表现为弱暖期,2 个冷期分别为:1741 ~ 1778 年,1812 ~ 1933 年。另外,年平均气温线性气候倾向率为 $0.011^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,

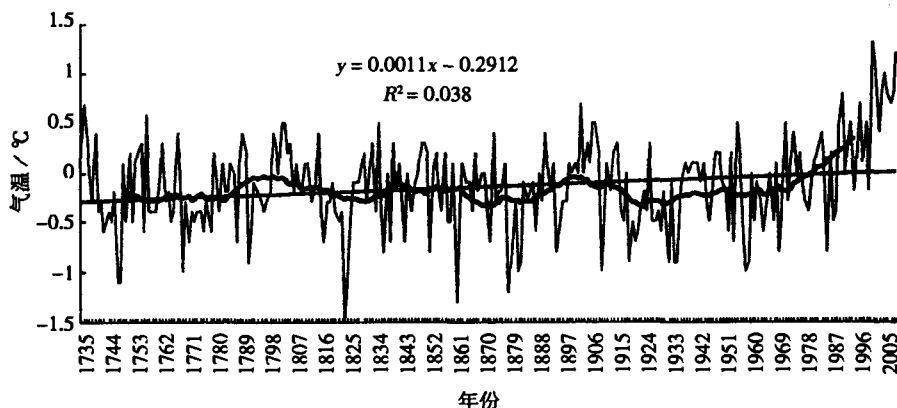


图 1 1735 ~ 2006 年以来青海高原年平均气温年际变化

细实线:年平均气温,粗实线:30 a 滑动平均,直线:线性回归趋势

Fig. 1 The inter-annual variation of annum mean temperature in Qinghai Plateau during 1735 ~ 2006
(thin solid line for annum mean temperature, thick solid line for 30-year moving-mean, straight line for linear regression tendency)

它表示青海高原年平均气温从 1735 年以来,以升温趋势为主。20 世纪下半叶青海高原升温比较快且明显,1961 ~ 1990 年青海高原年平均气温为 -0.07°C ,1971 ~ 2000 年为 0.17°C ,后 30 a 比前 30 a 年平均气温上升了 0.1°C ;从年代际来看 20 世纪 50 年代年平均气温为 -0.31°C ,60 年代年平均气温为 -0.25°C ,70 年代年平均气温为 -0.04°C ,80 年代年平均气温为 0.04°C ,90 年代年平均气温为 0.43°C ,50 a 来上升约 0.74°C ,2001 ~ 2006 年平均气温为 0.88°C ,后 6 a (2001 ~ 2006 年)比前 30 a 平均气温升高了 0.71°C ,1998 年为历史上年平均气温最高的一年,比 1971 ~ 2000 年 30 a 标准气候值偏高 1.2°C ,近 100 a (1907 ~ 2006 年)年平均气温的升温率为 $0.14^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,这与全国的气温增暖时间基本一致。

3 青海高原气温变化的小波分析

由于气候系统是多时间尺度系统,用常规方法

可以判断出气候变化的主要周期,但不能揭示其多层次结构,本文利用 Mart 小波进行变换分析,分析前将序列资料利用对称延伸法进行了扩展,将消除小波分析的边界效应^[6]。

从图 1 可以看出,1735 年以来,青海高原地区的气温存在明显的周期变化,其周期变化的幅度和周期长度是不一致的,为了更深一步探讨年平均气温在不同时段的周期性,利用小波分析方法对不同时段和不同时间尺度的周期进行分析,图 2 为近 250 a 来青海高原年平均气温小波变换结果。

从图 2 可以看出,青海高原年平均气温的变化在不同的时期有不同的时间层次结构。在不同时域上,2 ~ 3 a、28 a、48 a 和 110 a 时间尺度上的周期变化都比较明显。110 a 以上大时间尺度上低频波发展很强,形成正负相间的周期振荡。1751 ~ 1784 年、1818 ~ 1886 年、1914 ~ 1986 年基本上均表现为负位相,说明青海高原年平均气温处于偏低期,而 1735 ~ 1750 年、1785 ~ 1817 年、1887 ~ 1913 年、

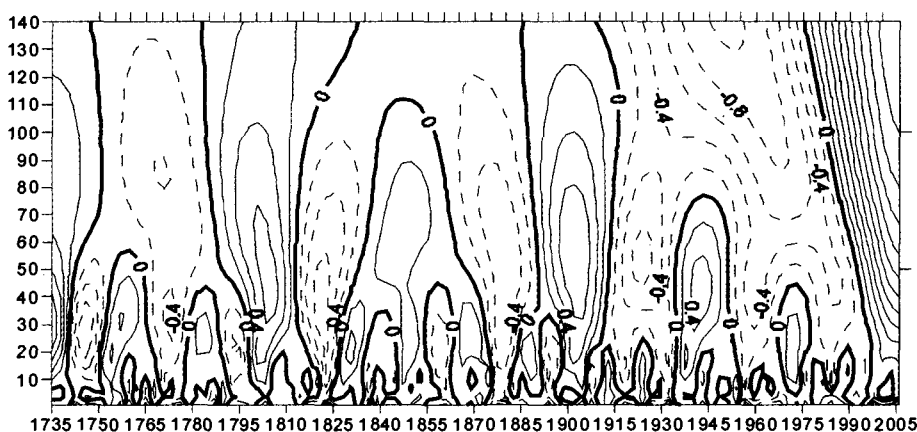


图 2 近 250 a 来青海高原年平均气温小波变换结果(——正值 - - - -负值)

Fig. 2 The wavelet analysis for annual mean temperature in Qinghai Plateau in the recent 250 years
(solid lines for positive values, dashed lines for negative values)

1986 ~ 2006 年基本上均表现为正位相,说明青海高原年平均气温处于偏暖期。由于较小时间尺度的周期振荡存在,在大尺度的周期振荡背景中,也会出现相对暖或冷的时期,年平均气温比较复杂,则增加了更多的相对冷、暖交替阶段。在 1735 ~ 1784 年以 30 a 以下周期变化为主,主要出现在 18 世纪 80 年代以前,经历了 5 个冷暖交替的阶段,1741 ~ 1751 年、1766 ~ 1778 年为偏冷期,1735 ~ 1740 年、1752 ~ 1765 年、1779 ~ 1788 年为偏暖期。而在 1785 ~ 1953 年时段里则以较长周期(48 a 左右)变化为主,主要出现在 18 世纪末期至 20 世纪 50 年代,经历了 7 个冷暖交替:1791 ~ 1812 年、1833 ~ 1868 年、1891 ~ 1912 年和 1935 ~ 1951 年为偏暖期,1813 ~ 1832 年、1869 ~ 1890 年和 1913 ~ 1934 年为偏冷期;到 20 世纪 30 年代至 90 年代较长周期变化比较乱,无明显的周期规律。另外 1799 ~ 1800 年、1802 ~ 1803 年、1905 ~ 1906 年、1998 ~ 1999 年和 1736 ~ 1737 年、1880 ~ 1881 年、1932 ~ 1933 年、1955 ~ 1957 年在所有周期上均表现为正位相和负位相,不同周期的振荡同位相叠加,从而形成青海高原不同时期的高温年和低温年。

4 突变分析

在青海高原气温重建记录中,不论冷期还是暖期,都可以看出突变特征。大量的观测事实表明,气候突变是一种多时间尺度现象。气候状态的跳跃可以发生在从季节、年际、10 a 或 100 a,甚至更长的时

域内,它存在于各种时间尺度中。时间尺度的变化会导致突变点进化或退化。常见的气候突变有均值突变、方差突变和转折突变等,但实际的情形很可能是 2 种或 2 种以上的突变类型的复合形式^[7]。图 3 为年平均气温小波分析的结果,从中可以看出,在 120 a 时间尺度上,存在 6 个突变点,分别为 1750 年、1784 年、1824 年、1886 年、1915 年和 1979 年;在 60 a 时间尺度上突变点增加为 10 个,分别为 1746 年、1788 年、1813 年、1835 年、1864 年、1890 年、1914 年、1936 年、1951 年和 1990 年;在 30 a 时间尺度上,突变增加到 23 个,分别为 1741 年、1752 年、1766 年、1779 年、1788 年、1798 年、1814 年、1828 年、1838 年、1844 年、1855 年、1864 年、1874 年、1886 年、1891 年、1897 年、1912 年、1935 年、1952 年、1968 年、1977 年和 1996 年;而在 15 a 时间尺度上,突变点增加到 37 个。由此看到,随着时间尺度的减小,可以看到越精细的结构。从图 3 看,突变点只有在确定的时间尺度上才有意义,随时间尺度的变化,有一些平常点随着层次的降低进化为突变点,相反随着层次升高,一些突变点退化为平常点。

为了检验以上的突变点,采用滑动 t 检验方法来检验突变信号,检验结果见图 4。从图 4 检验结果看出,子序列长度的不同选择,造成了突变点存在一定的漂移,但存在共同的突变信息。当相邻 2 个时段变化特征之间存在显著差异,说明气候变化在“分界年”可能存在突变。在子序列长度 $n_1 = n_2 = 25$ a 时,存在 3 个突变点为 1907 年、1913 年、1977 年;在 $n_1 = n_2 = 20$ a 时,突变点有 8 个,分别为 1886

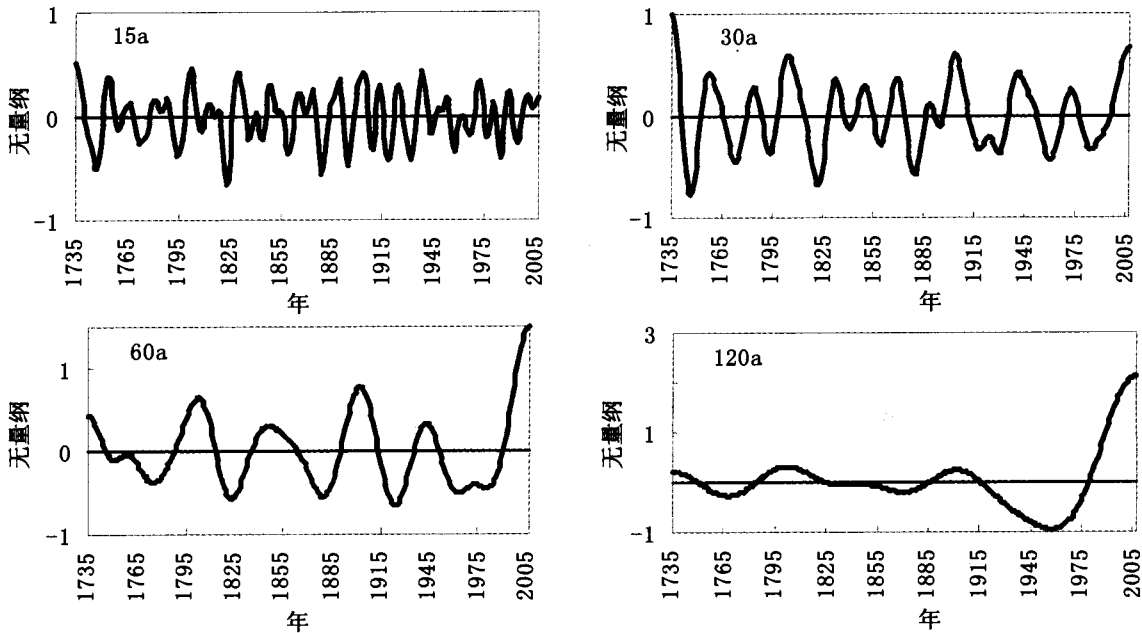


图3 青海高原地区 250 a 来年平均气温小波分析结果

Fig. 3 The wavelet analysis result for annual mean temperature in Qinghai Plateau in the recent 250 - year

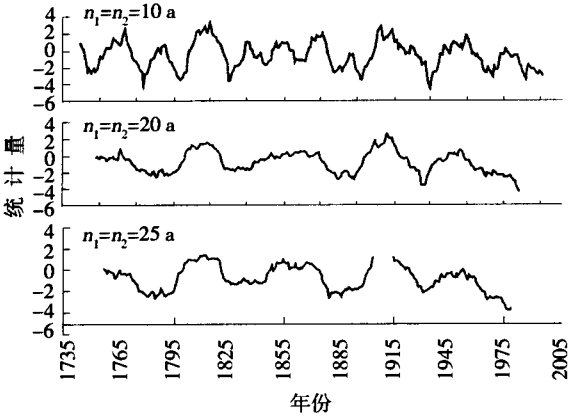


图4 青海高原年平均气温滑动 *t* 统计量曲线

Fig. 4 The moving *t* - test statistical curve for annual mean temperature in Qinghai Plateau

年、1896 年、1907 年、1915 年、1917 年、1932 年、1936 年、1983 年；在 $n_1 = n_2 = 10\text{ a}$ 时，突变点有 9 个分别为 1778 年、1798 年、1811 年、1813 年、1815 年、1824 年、1907 年、1933 年和 1935 年。以上突变信号均通过了信度为 0.01 的检验。

表 1 列出了小波分析和滑动 *t* 检验 2 种突变分析的结果。从表 1 可以看出 2 种方法检验的结果均在 1778 年、1814 年、1886 年、1913 年和 1979 年检测到显著的突变。刘莉红等^[8]指出我国气温变化有 3 个突变点，分别是 1920 年、1955 年和 1985 年，目前我国气温仍处于偏暖期，偏暖将持续一段时间；刘晓东^[9]曾根据近 40 a 高原温度与北半球温度的相关，将高原的平均温度曲线延长到本世纪初，据此曲线将本世纪的高原气温划分为 2 个冷段和 2 个暖段，

表 1 不同时间尺度的小波分析和滑动 *t* 检验的突变年份

Tab. 1 The years for abrupt change obtained from wavelet analysis and moving *t* - test for different time scales

时间尺度/a		突变发生的年份							
小波检验	120 a	1750	1784	1824	1886	1915	1979		
	60 a	1746	1788	1835	1864	1890	1913	1935	1990
	30 a	1752	1765	1778	1788	1814	1837	1844	1854
		1873	1886	1891	1911	1952	1967	1977	1996
滑动 <i>t</i> 检验	30 a	1976							
	25 a	1907	1913	1979					
	20 a	1886	1896	1907	1914	1934	1986		
	15 a	1814	1913	1933	1986				
	10 a	1778	1811	1814	1825	1907	1933		

注：信度为 0.01

共 3 个突变年:1918 年和 1971 年为“暖突变”1952 年为“冷突变年”;李林等^[5]指出青藏高原气温年际波动呈现出明显的上升趋势,并在 20 世纪 80 年代中后期发生过突变,与本文青海高原 20 世纪气温突变结果(1913 年、1952 年、1986 年)基本一致,反映了青海高原气候变化与全球及中国气候变化密切相关。

5 青海高原年平均气温与已有成果的比较

青海高原年平均气温与王绍武^[10]近 100 a (1880~1996 年)中国年平均气温序列比较,青海高原年平均气温序列的主要冷、暖期多数时段大体上与已有成果基本吻合,主要差异体现在主要冷、暖期出现的位相和主要冷、暖期的冷、暖幅度稍有不同,此外,重建序列 19 世纪前半叶反映的是一个暖期,而不是弱的冷期,1901~1907 年同为相对的暖期,但青海高原上暖的幅度明显大于全国,然而 20 世纪 30、40 年代的暖期高原上又没有全国那么突出。近 100 a 来全球升温是一个不争的事实,根据王绍武^[10]等 1880~1989 年中国年平均气温序列的计算,其升温率为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,低于全球平均的 $0.5\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,而青海高原同期年平均气温的升温率为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,年平均气温的升温率远低于全国和全球。与吴祥定^[11]利用西藏 10 个表征年平均气温的树木年轮年表重建的 1512~1975 年西藏年平均气温序列相比较,青海高原年平均气温序列主要冷、暖期出现的位相和主要冷、暖期的冷、暖幅度与西藏年平均气温的变化一致。尤其是与西藏南部和横断山区年轮序列表征的气温变化极为相似,1900 年前后为明显的暖期,且暖的程度明显高于 20 世纪 40 年代。

6 结 论

(1)250 多 a 来青海高原最冷年出现在 19 世纪的 1823 年,年平均气温为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最暖年出现在 20 世纪的 1998 年,年平均气温为 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均

气温升温率为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,它表示青海高原年平均气温从 1735 年以来,以升温趋势为主;20 世纪 50 a 代以来升温比较明显,50 a 来上升约 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,近 100 a 来升温率为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。

(2)小波分析结果表明:250 多 a 青海高原年平均气温在 100 a 以上的时间尺度上,主要表现为暖—冷—暖—冷—暖—冷—暖 7 个阶段,构成青海高原 2 个半世纪的年平均气温变化特征;青海高原年平均气温时间序列存在 2~3 a、28 a、48 a 和 110 a 主要周期振荡。

(3)气候突变分析发现近 250 多 a 来青海高原年平均气温的冷暖交替具有突变特征,明显的暖突变年为 1778 年、1886 年和 1979 年,冷突变年为 1814 年、1913 年。

参考文献:

- [1] 刘禹,马利民,蔡秋芳,等.采用树轮抱定碳同位素重建贺兰山 1890 年以来夏季(6~8 月)气温[J].中国科学(D 辑),2002,32(8):667~674.
- [2] 陈拓,秦大河,李江风,等.从树轮纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 序列看树木生长对 CO_2 浓度变化的响应[J].冰川冻土,2001,23(1):41~45.
- [3] 汪青春,秦宁生,李栋梁,等.利用多条树轮资料重建青海高原近 250 年年平均气温[J].高原气象,2005,24(3):320~324.
- [4] 靳立亚,秦宁生,勾晓华,等.青海南部高原近 450 年来春季最高气温序列及其时变特征[J].第四纪研究,2005,25(3):195~199.
- [5] 李林,朱西德,秦宁生,等.对青藏高原气温变化及其异常类型的研究[J].高原气象,2003,22(5):524~530.
- [6] 林振山,邓自旺.子波气候诊断技术的研究[M].北京:气象出版社,1999.38~88.
- [7] 魏凤英.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社,1999.66~68.
- [8] 刘莉红,郑祖光.在近百年我国气温变化的突变点[J].南京气象学院学报,2003,26(3):378~383.
- [9] 刘晓东.高原气候变化原因的数值模拟分析[A].见:汤懋苍等主编.青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M].广州:科学技术出版社,1997.
- [10] 王绍武,叶瑾琳,龚道溢,等.近百年中国年平均气温序列的建立[J].应用气象学报,1998,9(4):392~401.
- [11] 吴祥定.利用树木年轮与气候变化[M].北京:气象出版社,1990.238~250.

Annual Mean temperature Variation and Analysis on Its Abrupt Change in Recent 250 - year in the Qinghai Plateau

NIE Guoyan^{1,2}, QING Ninsheng³, WANG Qingchun³, LIU Qingchun⁴, SHI Xinghe³

(1. Meteorology Science and Technology Novation Base of Qinghai Province, Xi'ning 810001, China;
2. Hainan Meteorological Bureau of Qinghai Province, Hainan 813000, China; 3. Climate Center of Qinghai
Province, Xi'ning 810001, China; 4. Training Center of Qinghai Provincial Meteorological Bureau, Xi'ning 810001, China)

Abstract: Based on the 250 - year annual mean temperature sequence reconstructed by multi - piece of tree - rings in the Qinghai Plateau, the abrupt change characteristics and inter - annual variation of annual mean temperature there are synthetically analyzed by using methods of linear tendency, wavelet analysis and abrupt change test. The result shows that annual mean temperature fluctuated remarkably in recent 250 years in the Qinghai Plateau, and the 30 - year moving - mean presented higher annual mean temperature during 1779 - 1811 and 1934 - 2006, and the highest annual mean temperature (1.3°C) in 1998; while lower annual mean temperature during 1740 - 1778 and 1812 - 1933, and the lowest value (-1.5°C) occurred in 1823, but annual mean temperature generally kept rising. On relatively large scale beyond 20 - year, the seven alternations of coldness and warmness for annual mean temperature appeared obviously. On time scales of two to three years, 28 - year, 48 - year and 110 - year, the cycle variation was comparatively evident.

Key words: Qinghai Plateau; temperature; wavelet analysis; abrupt change