

公元 1820 年以来甘肃东大山地区树轮宽度对 3—9 月平均最低温度的响应分析

刘 禹^{1,2},解 利^{1,3},李 强¹,蔡秋芳¹

(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 环境科学与技术系, 西安 710049; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:本文以采集于甘肃东大山地区青海云杉树芯样品为研究对象,建立了公元 1820 年以来该地区标准宽度年表。通过响应函数分析发现,东大山地区树木生长明显受到上年最低温度的影响,树轮宽度较好地反映了东大山地区 192 年以来 3—9 月平均最低温度变化特征。东大山地区 3—9 月平均温度变化表现为两个大的阶段:1820—1950 年期间温度变化趋势平稳,略有下降,以冷期为主;1950 年以后升温趋势明显,以暖期为主,这一时段气温变化趋势与实际气象观测数据结果一致。功率谱分析显示该序列存在 2~4 年的准周期变化,与 ENSO 变化周期有一定的联系。宽度序列与近两百年来的火山喷发事件存在很好的一致性,反映出该地区树木径向生长对火山活动反映敏感,较大的火山喷发与低气温有一定的联系。

关键词:甘肃东大山;青海云杉;树轮宽度;最低气温;响应分析;火山活动

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-9901(2012)03-0900-08

Growth-climate response analysis between tree-ring width and March—September mean minimum temperature in Dongda Mountain, Gansu, China since 1820 AD

LIU Yu^{1,2}, XIE Li^{1,3}, LI Qiang¹, CAI Qiu-fang¹

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Department of Environment Science and Technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:This study collected cores of qinghai spruce from Dongda Mountain located in the middle of Hexi Corridor to reconstruct the standard width chronology of this region since 1820 AD. Tree growth in this region is clearly influenced by the minimum temperature of previous year through the response analysis between tree-ring width and March—September mean minimum temperature. And the variation of the tree-ring width is also corresponding to that of March—September mean minimum temperature to some extent. There are two major stages found in the series. From 1820 AD to 1950 AD, the trend of minimum temperature has been stable and been colder phase. On the contrary, it has been rising constantly and been warmer phase with the same variation trend of the meteorological observation since 1950 AD. Power spectral analysis reveals that there are four quasi-periodicities (2~4 a) within the scope of ENSO cycle. Volcanic eruption events in nearly two hundred years by now could be caught to a large extent by the tree-ring width sequence reflecting the radial growth of trees is sensitive to volcanic activity.

Key words:Dongda Mountain; Gansu; *Picea crassifolia*; tree-ring width; the lowest temperature; response analysis; volcanic activity

收稿日期:2012-04-30

基金项目:国家自然科学基金(40890051);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-04);中国科学院百人计划;中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q1-01);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金

通讯作者:刘禹,E-mail:liuyu@loess.llqq.ac.cn

二十世纪全球变暖是个不争的事实,气候变化是当今科学的一个重要议题。然而可利用的器测资料记录时间太短,无法利用其进行长时间尺度气候变化的研究。因此气候代用指标成为进行气候研究的重要手段。树木年轮以定年准确、连续性强、分布范围广等特点,成为过去气候变化研究的主要手段之一。

利用树轮资料进行温度变化的研究已经取得许多重要的成果,Bradley et al(1999)、Mann and Jones(2003)、Moberg et al(2005)和Esper et al(2002)主要综合利用树轮资料,重建了北半球过去千年尺度的温度变化,发现二十世纪是千年来温度最高的时段,增温幅度最大。刘禹等(2011)利用现生活树及考古树木建立并分析了青藏高原中东部2485年来温度变化幅度、速率、周期、原因及未来趋势;邵雪梅等(2007)初步建立了柴达木盆地东北部3500年树轮定年年表;Zhang et al(2003)重建了青藏高原东北部地区2326年的树轮年表;Liu et al(2009)重建了南五台地区5—7月温度变化序列;Cai and Liu(2007)利用树轮资料重建了贺兰山地区1—7月的温度变化;Song and Liu(2011)利用树轮重建了崆峒山地区283年以来PDSI变化;Gou et al(2006)重建了阿尼玛卿山地区830年以来的夏半年最高温度变化;Chen et al(2012)利用最大晚材密度重建了河西走廊中部的温度变化。这些温度变化的研究为了解中国中部地区过去数百年来的气温变化起到了良好的作用。

本文将对甘肃东大山地区的树轮宽度进行研究,分析树轮对当地的温度响应及树木生理学意义,分析3—9月平均最低温度的变化特征及其周期,探讨树轮生长对火山喷发的响应关系等等。

1 材料与方法

1.1 采样点概况与样本采集

采样点(图1)位于甘肃省张掖市东北方向约30 km的东大山自然保护区内($39^{\circ}03'N$, $100^{\circ}46'E$)。其北面为巴丹吉林沙漠,南侧为河西走廊中段,属于温带大陆荒漠性气候:冬冷夏热,年温差大,降水集中,四季分明,年降雨量较少,大陆性强。年平均温度为 $6.3^{\circ}C$,年平均降水量为196 mm。

样品于2012年4月份采自东大山北坡,海拔高度在2900~3200 m。采样点地区水分条件较为充足,植被覆盖度>0.8。该区主要树种为青海云杉(*Picea crassifolia*),土壤为森林褐色土。共采集39

棵青海云杉。按照国际树木年轮库标准,每棵树从不同的角度采集树芯1~2个,共计66个树芯。

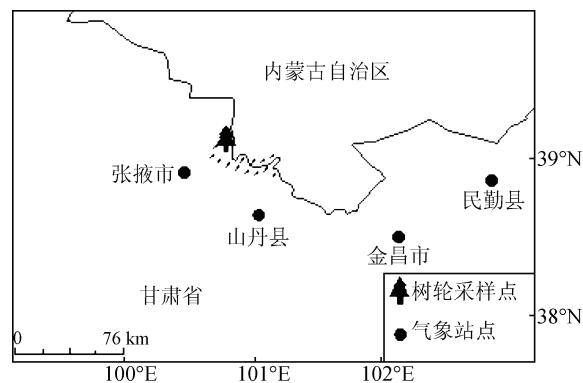


图1 采样点及气象站示意图

Fig. 1 The location of sampling sites and meteorological stations

1.2 年表的建立

样本首先在自然状态下干燥后,按照基本程序进行固定、磨光处理和交叉定年(Stokes and Smiley, 1996)。使用测量精度为0.01 mm的LINTAB宽度仪进行样品年轮宽度的测量工作,然后利用COFECHA程序软件对测量和定年结果进行质量控制,与主序列差异较大以及相关性较低的树芯最终被剔除。结果表明,东大山地区样品最长序列为255年,各序列间相关达到0.65。

年表的建立采用ARSTAN(Cook and Kairiukstis, 1990)程序完成。为了尽量保留序列中的气候信息,本文利用负指数函数或线性函数对每个测量序列进行趋势拟合,最终得到标准(STD)、差值(RES)和自回归(ARS)三种年表。由于STD年表既包含年际间的高频信息,又包含低频气候信号,因此下文采用STD年表进行分析(图2)。表1列出了树轮宽度指数序列的统计量及共同区间(1873—2010年)分析的结果。本文通过子样本信号强度SSS来确定年表的可靠起始年代(Wigley et al, 1984),设定SSS门限值为0.80,年表的起始年代确定为1820年,序列长度为192年。

2 响应分析

2.1 响应分析结果

采样点周围有四个气象站:张掖,山丹,民勤和托勒气象站。所采用的气候数据为上年9月至当年8月共12个月的月平均(最低、平均、最高)气温和月降水量数据。四个站点的各气象要素(温度和降水)之间呈现很好的一致性(图3),说明研究区气候变化相对一致。

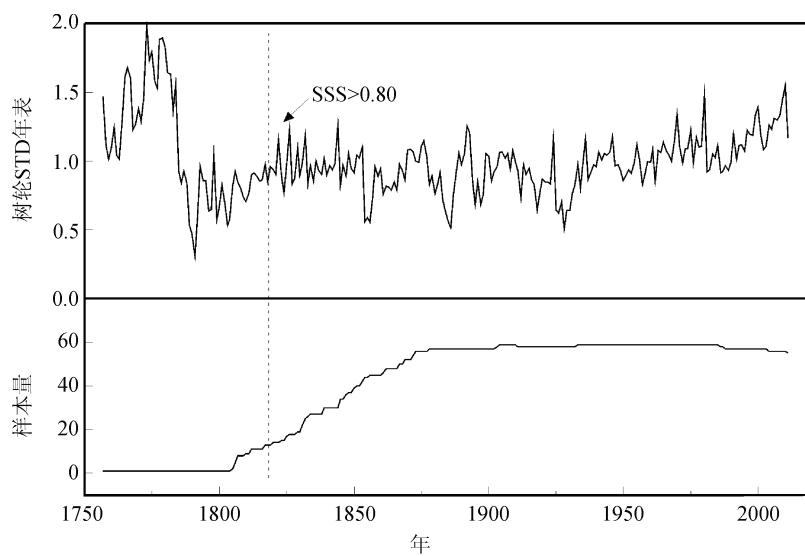


图2 东大山青海云杉树轮宽度曲线及样本量图
Fig. 2 STD chronology of tree rings in Dongda mountain and the samples size over time

表1 东大山青海云杉树木年轮宽度标准 STD 年表统计特征

Table 1 The statistical characteristics of the standard (STD)
chronology of Dongda mountain

统计项	STD
平均敏感度	0.17
均方差	0.40
一阶自相关系数	0.65
所有样芯间的相关系数(r_1)	0.32
树间的相关系数(r_2)	0.31
同树两芯间的相关系数(r_3)	0.52
第一主分量所占方差(PCI, %)	37.84
样本总体代表性(EPS)	0.93
信噪比	14.16
子样本信号强度 SSS > 0.80 的第一年(树数)	1820(9)

我们将树木年轮宽度数据与四个站点的气象数据做相关分析,发现张掖和山丹两地与采样点距离最近,相关性相对较好,本文最终采用张掖和山丹两个气象站的记录进行分析。两地的气温、降水与树轮宽度的相关性如图4所示。从图中可以看出,树轮宽度与张掖、山丹两地气温呈现正相关,树轮宽度与上年9、10月份以及当年5、7、8月平均气温显著正相关($p < 0.05$);树轮宽度与降水相关性较差。其中树轮宽度与张掖地区上年6月至当年5月降水相关系数最高, $r = 0.21$ 。PDSI相关分析结果呈现负相关(图略),相关系数低。

由于轮宽与温度相关性相对较强,因此本文对其进行了更深入的分析。分析结果(图5)显

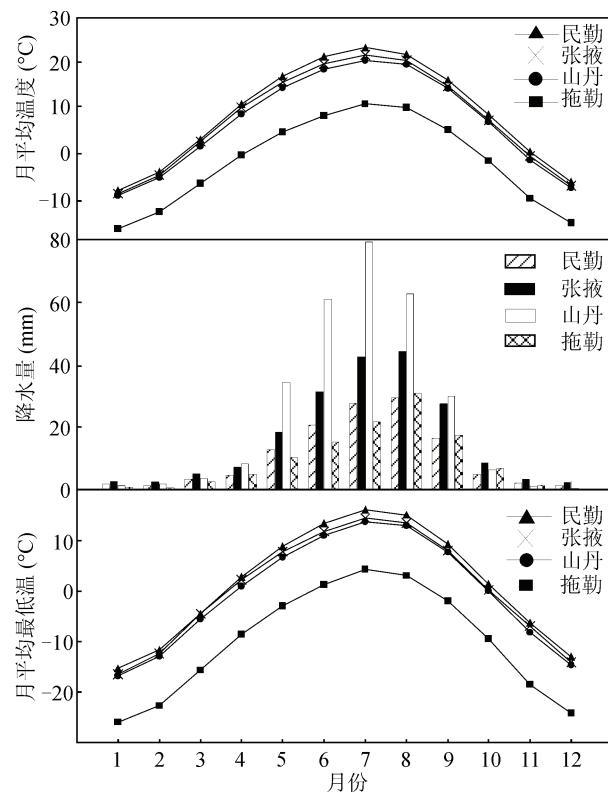


图3 张掖、山丹、民勤和托勒四气象站平均气温、降水及月平均最低温度图

Fig. 3 Monthly mean temperature, monthly minimum temperature and monthly precipitation of the meteorological stations

示树轮宽度与山丹上年9、10、11月份以及当年4、5、7、9月的平均最低温度显著正相关,其中与上年9月份平均最低气温相关达到0.53。反映出上年月平均最低温度对下一年树木生长的影

响是十分明显的。

通过1953—2008年的山丹气象站月平均最低温度与树轮宽度数据散点图(图6)发现,两者呈现线性相关,但图中存在两个较为明显异常值(1970年和1980年)。在进行相关性计算时,这两个异常点存在时相关系数仅为 $r=0.48$ ($p < 0.01$),如果去掉这两个异常值则相关系数能够提高为 $r=0.63$ ($p < 0.00001$)。为了保留原始数据的真实性,文章并没有同时去除这两个点的数据,通过分析比较,最终采用去除1970这点之后的数据。

从图5可以看出,树轮宽度与当年3—9月份的月平均最低温度相关最高, $r=0.557$ ($p < 0.01$),其次是3—7月份月平均最低温度($r=0.523$, $p <$

0.01)。虽然3—9月份的月平均最低温度与树轮宽度数据的方差解释量超过了31%,显著性强,但仍达不到重建的水平。尽管如此,东大山地区的青海云杉宽度仍然不失为当地温度变化的代用序列,大体上可以反映过去190年来该地区的温度变化状况。因此本文主要将对树轮宽度与月平均最低气温的响应进行定性分析。

2.2 生长季温度的树木生理学意义

东大山地区树轮宽度与降水的相关性不高,原因可能是由于采样点位于森林上限位置,海拔较高,降水量较丰富,导致在该样点降水非树木生长的限制因子,这前人(张瑞波等,2008; Gou et al., 2007)在距本研究点不远的祁连山研究所得结果一致。

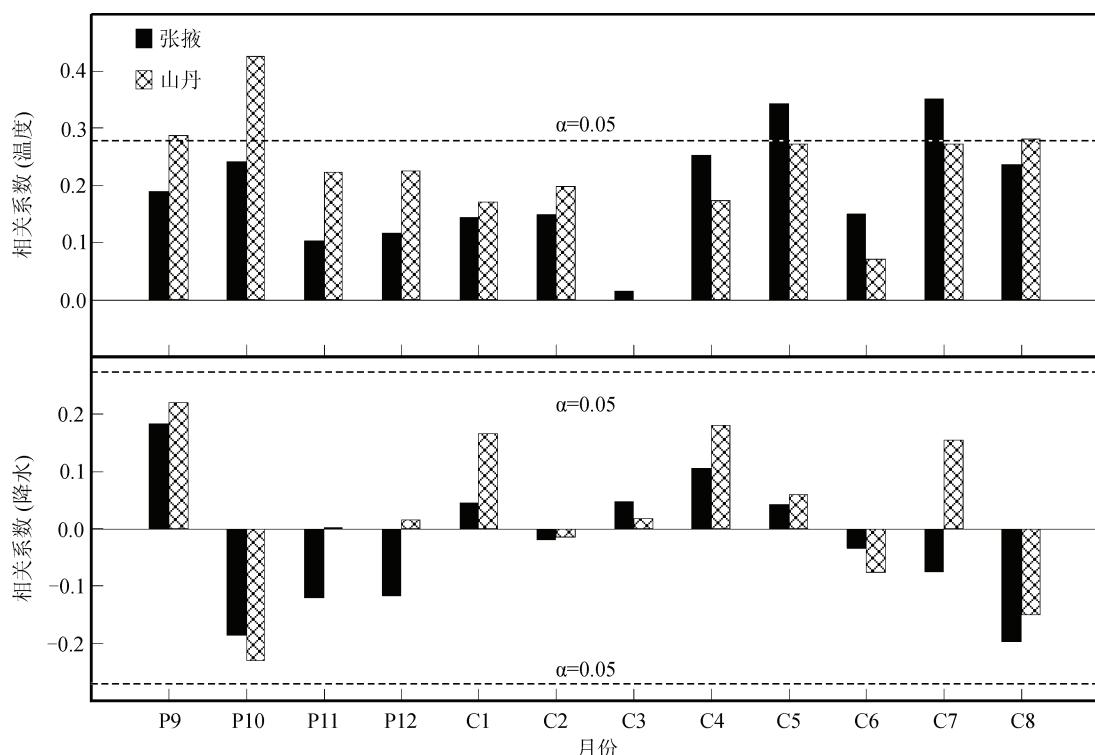


图4 树轮宽度与张掖、山丹两地气温、降水相关性图(P代表上一年,C代表当年)

Fig. 4 The correlations between STD chronology and meteorological data

从树木生理学上说,在树线附近较低的土壤温度会抑制根的生长和水分的吸收,树线附近针叶树管胞在生长季分化和扩张,而生长季最低温度是影响形成层活动的重要因子(徐国保等,2009)。在生长季前期,最低温度越高,土壤温度也相应升高,有利于植物根系活动,促进形成层提前活动进行细胞伸长和分裂,有利于生长季提前。因此3—9月平均最低温度对树木年轮的生

长产生重要的影响。

3 树轮宽度反映的最低温度变化及其与其他资料对比

3.1 以树轮宽度为标准推测东大山地区192年以来的温度变化

虽然不能够利用树轮宽度数据进行气候重建,但可以利用树轮宽度资料与3—9月平均最低温度的

较高正相关关系($r = 0.557, p < 0.00001$)，是可以用来对东大山地区过去192年来3—9月平均最低温度的历史变化进行分析和判断。

分析结果显示，在过去的192年里，1980年温度最高；温度最低的十个年份分别为1854、1855、1856、1884、1885、1886、1926、1928、1929和1930，其中1928年温度最低；温度最高的十个年份分别为

1970、1980、1999、2000、2004、2006、2007、2008、2009和2010，其中1980年温度又是温度序列中温度最高的年份。从图7可以看出，温度最低的年份主要分布于19和20世纪中期以前，分布相对较均衡；而温度较高的年份几乎全部集中于20世纪中期以后。从整个序列看，从1928年的最低温以来，研究区3—9月平均气温持续升高。

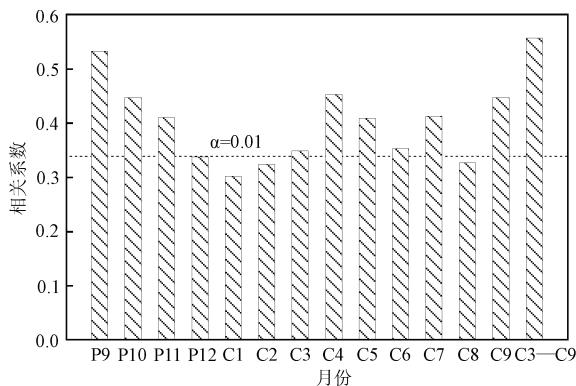


图5 逐月最低温度及月份组合与树轮宽度
相关系数图(P代表上一年,C代表当年)

Fig. 5 The correlations between the STD chronology and monthly mean temperature

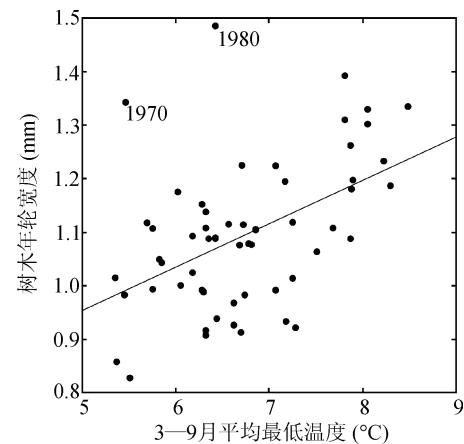


图6 树轮宽度与3—9月平均最低温度散点图

Fig. 6 Scatter plot of the tree-ring width and March to September mean minimum temperature

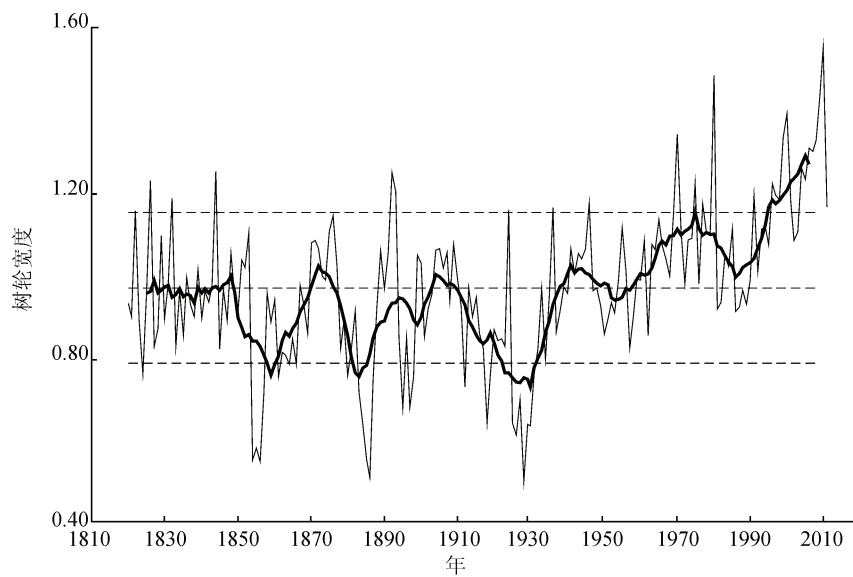


图7 年轮指数表征的3—9月平均最低温度变化及冷暖期分布图
(图中粗实线为11年滑动平均结果,细实线为树轮宽度值,虚线为平均温度加减标准差,中间虚线为树轮宽度指数平均值)

Fig. 7 The March to September mean minimum temperature based on the STD chronology
(the thin line), 11-year averaging smoothing data (the thick line)

本文使用下列方法计算冷暖期：暖期为 $W + 1\sigma$ ，冷期为 $W - 1\sigma$ (刘禹等,2011)。其中 W 为树轮宽度的平均值， σ 为树轮宽度序列的标准差。通过分析可以看出东大山地区自1820年以来

存在3个冷期和2个暖期，如下表所示(表2)。1950年之前出现的都是冷期，1950年之后均为暖期。1820—1950年之间3—9月平均最低温度在平均值偏下位置波动，但基本保持平衡；

在1950年之后,月平均最低温度上升趋势非常明显,基本都在平均值之上。因此,1950年之后的增温使得整个曲线的标准差上升,进而使得整个序列冷暖期的变化和分布不均衡。

表2 轮宽序列表征的冷暖期分布表

Table 2 The warm and cold phrases based on STD chronology

年代	冷期	暖期
1853—1875	✓✓	
1880—1898	✓✓	
1917—1941	✓✓	
1965—1990		✓✓✓
1991—2012		✓✓✓✓

为了能够更直观的显示20世纪50年代后升温趋势及树轮宽度与3—9月平均最低温度的关系,本文选取了相同时段的气象数据与宽度数据进行比较,结果如图8所示。虽然对应的取值存在差别,但3—9月平均最低温度与轮宽数据的变化趋势一致,气象数据变化趋势相对更较明显。说明如果未来持续升温,有利于研究区域树木(青海云杉)的粗生长,对当地森林抚育有一定的指导意义。

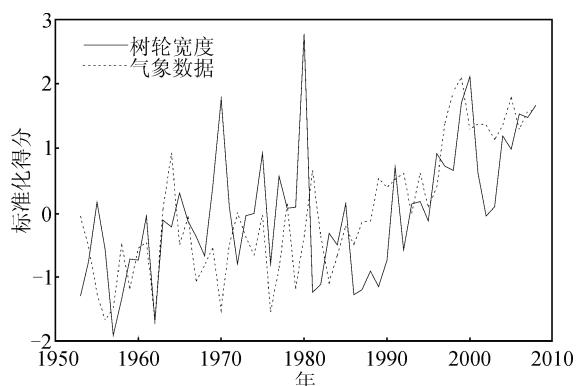


图8 1953—2008年山丹3—9月平均最低温与年轮宽度变化趋势图

Fig.8 The comparison between the STD chronology and March to September mean minimum temperature from 1953 AD to 2008 AD

3.2 功率谱分析

功率谱估计是数字信号处理的主要内容之一,主要研究信号在频域中的各种特征,目的是根据有限数据在频域内提取被淹没在噪声中的有用信号。

功率谱分析表明,在95%置信度上有4.59 a、2.79 a、2.39 a和2.43 a的准周期(图9)。这几个周期都处在ENSO的周期范围内,说明研究区的温度变

化可能与ENSO活动存在某种联系(刘禹等,2010)。

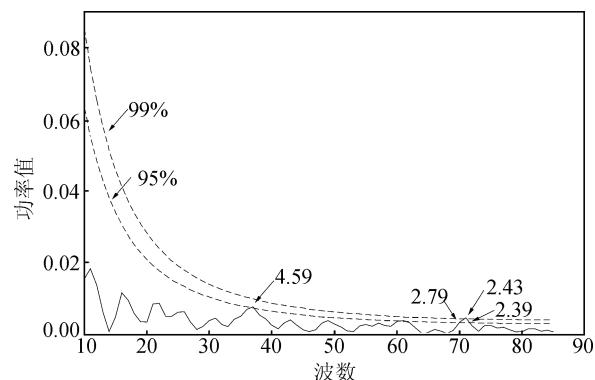


图9 功率谱分析
Fig.9 Power spectrum analysis of the STD chronology

3.3 与其他树轮资料对比

Chen et al (2012)利用东大山地区青海云杉的最大晚材密度重建了河西走廊中段5—8月平均最高温度的变化历史。通过图3和图5可以发现,张掖山丹地区最低温与最高温的变化趋势基本一致。本文通过比较树轮宽度数据与Chen et al (2012)重建的5—8月平均最高温的11年滑动数据发现,研究区3—9月平均最低温度的变化趋势与5—8月平均最高气温的变化趋势大体一致(图10)。在20世纪70年代,两条曲线出现不协调性,这与最开始发现的两个树轮宽度序列中的异常值相一致,说明树轮宽度在70年代可能存在某些扰动。

3.4 与火山资料对比

火山爆发后往往会增强漫反射和减少太阳直接辐射造成“阳伞效应”,从而减少到达地面的太阳辐射,树木的生长可能会记录火山活动(徐国保等,2009)。通过查询1800年之后主要火山喷发时间及影响,同时对比与东大山树轮宽度序列可以发现,虽然时间上可能存在一定的滞后效应,但序列中窄轮年份与主要火山喷发时间具有较为明显对应关系(图11、表3),说明同密度指数一样(Chen et al, 2012)该树轮宽度序列对反映过去时期温度变化具有一定的可靠性。

然而图中明显的存在一个低值区1925—1931年。这个低值区域的产生与火山活动无关。通过查找资料并对比已有的树轮数据(梁尔源等,2004),西北地区20世纪20年代存在一个明显干旱时段,反映到该序列显示为低温导致窄轮的产生。

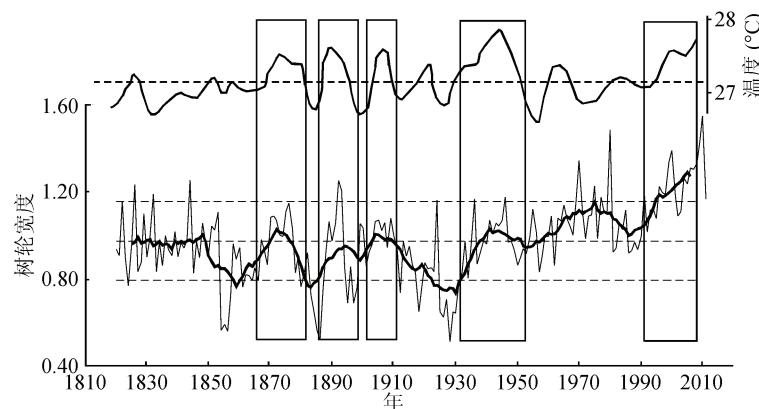


图 10 树轮宽度(下图)与 5—8 月重建最高温(上图)11 年滑动平均对比图

Fig. 10 The comparison between the STD chronology and
11-year-averaging-smoothing May to August reconstruction maximum temperature

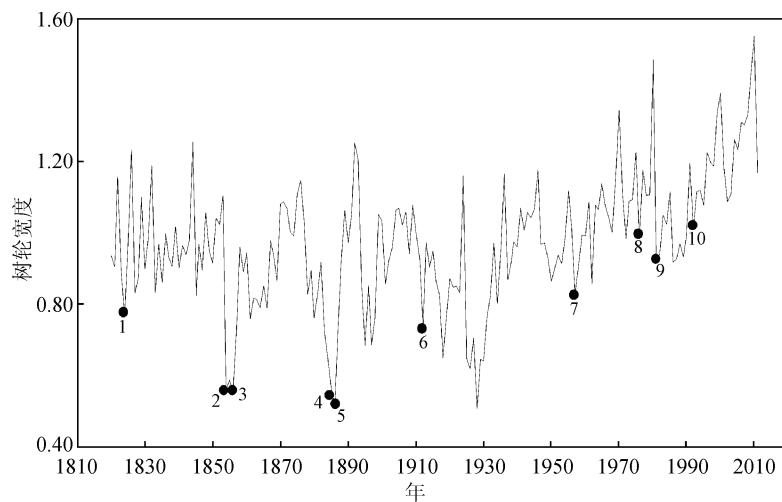


图 11 东大山树轮宽度序列与周边区域主要火山喷发对应关系图

Fig. 11 The corresponding relationship between STD chronology and the volcanic eruption around

表 3 主要火山名称及喷发年代

Table 3 The name, location and date of major volcanic eruption around the sample site

编号	火山名称	位置	喷发年代(AD)	编号	火山名称	位置	喷发年代(AD)
1	Galunggung	Indonesia	1823	6	Taal	Philippines	1911
2	Sheveluch	Russian	1854	7	Bezymianny	Russian	1956
3	Komagatake	Japan	1856	8	Augustine	US	1976
4	Krakatau	Java	1884	9	St. Helens	US	1981
5	Tarawera	New Zealand	1886	10	Pinatubo	Philippines	1992

4 结论

通过对甘肃东大山青海云杉树轮宽度与东大山 3—9 月平均最低温度响应分析发现,该地区 1820—2011 年期间最低温度总体呈现上升趋势,1820—1950 年温度在平均线稍下位置波动,基本保持平衡;1950 后温度上升趋势明显,显示出与全球气温

同步的升温趋势。功率谱分析显示该序列存在 2—4 年的准周期变化,处于 ENSO 周期范围内。宽度序列与近两百年来的火山喷发事件存在很好的一致性,反映出该地区树木径向生长对火山活动反映敏感。

致谢:感谢沈宝印实验员在采样过程中的帮助,感谢

雷莺在论文撰写时提供的指导和帮助。

参考文献

- 梁尔源,邵雪梅,黄磊,等.2004.中国中西部地区树木年轮对20世纪20年代干旱灾害的指示[J].*自然科学发展*,14(4):469—474.[Liang E Y, Shao X M, Huang L, et al. 2004. The indication of drought disaster in 1920s by tree rings in central and western China[J]. *Progress in Natural Science*, 14(4): 469—474.]
- 刘禹,蔡秋芳,宋慧明,等.2011.青藏高原中东部2485年来温度变化幅度、速率、周期、原因及未来趋势[J].*科学通报*,56(25):2042—2051.[Liu Y, Cai Q F, Song H M, et al. 2011. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(28—29): 2986—2994.]
- 刘禹,雷莺,宋慧明,等.2010.以白皮松树轮宽度重建公元1616年以来山东于林年平均最低温度[J].*地球环境学报*,1(1):28—35.[Liu Y, Lei Y, Song H M, et al. 2010. The annual mean lowest temperature reconstruction based on *Pinus bungeana* (Zucc.) ring width in the Yulin region, Shandong, China since AD 1616[J]. *Journal of Earth Environment*, 1(1): 28—35.]
- 邵雪梅,王树芝,徐岩,等.2007.柴达木盆地东北部3500年树轮定年年表的初步建立[J].*第四纪研究*,27(4):477—485.[Shao X M, Wang S Z, Xu Y, et al. 2007. A 3500-year master tree-ring dating chronology from the northeastern part of the Qaidam basin[J]. *Quaternary Sciences*, 27(4): 477—485.]
- 徐国保,刘晓宏,陈拓,等.2009.新疆哈密八大石森林上限树轮记录的温度变化信息[J].*山地学报*,27(4):402—410.[Xu G B, Liu X H, Chen T, et al. 2009. Temperature variations recorded in tree-ring width at timberline forest in Hami Badashi, Xinjiang[J]. *Journal of Mountain Science*, 27(4): 402—410.]
- 张瑞波,魏文寿,袁玉江,等.2008.新疆霍城地区树轮年表的建立及气候意义[J].*干旱区地理*,25(2):716—722.[Zhang R B, Wei W S, Yuan Y J, et al. 2008. Development and climatic significance of the chronologies of tree-ring samples from the Huocheng region, west Tianshan Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 25(5): 716—722.]
- Bradley R S, Mann M E, Hughes M K. 1999. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations[J]. *Geophysical Research Letters*, 26(6): 759—762.
- Cai Q F, Liu Y. 2007. January to August temperature variability since 1776 inferred from tree-ring width of *Pinus tabulaeformis* in Helan Mountain [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 17(3): 293—303.
- Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2012. Temperature reconstruction from tree-ring maximum latewood density of Qinghai spruce in middle Hexi Corridor, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 107 (3—4): 633—643.
- Cook E R, Kairiukstis L A. 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1—391.
- Esper J, Cook E R, Schweingruber F H, et al. 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability [J]. *Science*, 295(5563): 2250—2253.
- Gou X H, Chen F H, Jacoby G, et al. 2007. Rapid tree growth with respect to the last 400 years in response to climate warming, north eastern Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Climatology*, 27: 1497—1503.
- Gou X H, Yang M X, Peng J F, et al. 2006. Maximum temperature reconstruction for Animaqin Mountains over past 830a based on tree-ring records [J]. *Quaternary Sciences*, 26(6): 991—998.
- Liu Y, Linderholm H W, Song H M, et al. 2009. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China[J]. *Boreas*, 38(2): 285—291.
- Mann M E, Jones P D. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(15), 1820, doi:10.1029/2003GL017814.
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data[J]. *Nature*, 433(7026): 613—617.
- Song H M, Liu Y. 2011. PDSI variations at Kongtong Mountain, China, inferred from a 283-year *Pinus tabulaeformis* ring width chronology [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 116, D22111, doi:10.1029/2011JD016220.
- Stokes M A, Smiley T L. 1996. An introduction to tree-ring dating[M]. Tucson: The University of Arizona Press.
- Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D, et al. 1984. On the Average Value of Correlated Time-Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2): 201—213.
- Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, et al. 2003. A 2,326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(14), 1739, doi:10.1029/2003GL017425.