

陕西太白山树轮气候学研究

蔡秋芳¹, 刘禹^{1,2}, 王艳超^{1,3}

(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. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要:长时间序列的树轮气候记录在我国秦岭地区还非常缺乏。本文在陕西太白山地区建立了一条长113年(1898—2010)的油松树轮宽度年表。相关分析表明,树轮宽度除了与生长季前期4月份的平均(最低)气温和月降水量都显著相关,还与1、2月份的平均(最低)气温显著正相关。最终分析表明生长季前期1—3月平均最低气温是太白山地区树木生长的气候限制因子,因此树轮宽度年表可用来反映研究区过去一百多年来冬春季的最低气温变化历史。树轮宽度年表揭示了2次较暖时期(1906—1914, 1933—1947)和2次较冷时期(1920—1929, 1950—1970),可与周边其他地区冬半年温度重建序列进行对比。不同的是1960年代初期以来,太白山1—3月平均最低气温在波动中缓慢上升,至今似乎仍处于增温状态。

关键词:陕西太白山;油松;树轮宽度;1—3月平均最低气温

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2012)03-0874-07

Dendroclimatic investigation of Chinese Pine in Taibai Mountain, Shaanxi Province

CAI Qiu-fang¹, LIU Yu^{1,2}, WANG Yan-chao^{1,3}

(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. School of Mechanical Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Long-term tree-ring climatic records are scarce in the Qinling Mountain range, central China. Here we report a 113-year tree-ring width chronology of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) from the Taibai Mountain, covering the time span from 1898 to 2010. Correlation analysis revealed that the tree-ring width correlated significantly with both the monthly precipitation and monthly mean (minimum) temperature of April, in addition to this, the ring width also significantly positively correlated with the monthly mean (minimum) temperature of January and February, indicating that the mean minimum temperature from January to March (JM) was the limiting climatic factor controlling tree growth in the Taibai Mountains. The ring-width chronology demonstrated two warmer periods including 1906—1914 and 1933—1947, and two colder periods including 1920—1929 and 1950—1970, which were also recorded by surrounding tree-ring based temperature series. However, the warming trend since the 1960s in the Taibai Mountains is obvious, yet much gentler than other places.

Key words: Taibai Mountain; Shaanxi; Chinese pine; tree-ring width; the mean minimum; temperature from January to March

伴随全球变暖,气象灾害及极端气候事件发生的频率越来越高,全球变化下的区域气候、环境效应

变化日益受到越来越多的关注(Adams et al, 1998; IPCC, 2007; Walthers, 2010)。当前人类社会面临

的最迫切的任务之一就是要研究区域气候如何响应这种变化,进而为政府制定有效的气候应对政策提供科学数据。

高分辨率的气候代用指标(如洞穴石笋、湖泊沉积、珊瑚、树木年轮等)对评价现今温暖期气候的历史位置、揭示不同时期气候变化特征有重要意义(Mann et al, 2008)。树木年轮以其定年准确、分辨率高、复本量大、量化程度高等特点已成为过去全球变化研究的重要指标之一(Cook et al, 2010; Büntgen et al, 2011),在恢复过去2000年来全球及区域气候变化研究中发挥着重要的作用(Esper et al, 2002; Liu et al, 2011)。

秦岭是横亘于中国中部的一条东西走向的山脉,西起甘肃省境内,东到河南省西部,主体位于陕西省南部与四川省北部交界处,全长约1500公里。秦岭不仅是中国地理上最重要的南北分界线,同时也是长江流域与黄河流域的分水岭。秦岭作为亚洲东部最高山地,它的特殊地理位置决定了它在我国乃至全球区域气候、环境变化中有着举足轻重的作用(Liu et al, 2009)。邵雪梅等(1994)、Hughes et al (1994)、刘禹等(2009)对秦岭东端华山的油松、华山松进行了树轮气候学研究,分别重建了该区域过去几百年来降水、气温变化历史。Liu et al(2009)对秦岭中段南坡和北坡的油松进行树轮宽度研究,分别重建了秦岭南坡冬半年气温和秦岭北坡夏季气温变化历史。在秦岭西端也有学者进行了初步的树轮气候学尝试(戴君虎等,2003)。相对于秦岭这条巨大的山脉来说,目前的研究力度对揭示这一区域的历史气候变化显然是很不够的。

本文研究目的:1)建立秦岭太白山附近的油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)树轮宽度年表;2)探讨这条树轮年表的气候意义及对区域气候变化的指示意义。

1 数据和方法

1.1 树轮数据

采样区属于太白山国家级自然保护区,采样点(见图1)(107.5°E,33.8°N,海拔1500 m)位于秦岭北坡太白县东南约70余公里的黄柏塬乡核桃坪附近的原始森林。这片原始森林因位于陕西太白县与周至县两县交界处,所以许多原始的古树得以保存。这里年平均气温11℃,降水量为630~1030 mm,属暖温带和亚热带气候过渡区域。研究区植被茂盛,油松是优势树种,林间伴生有秦岭冷

杉、红桦等,林间郁闭度为0.3~0.5,土壤层较厚。2011年7月中旬在此共采集24棵树42根树芯,采样坡度为0~0.4。

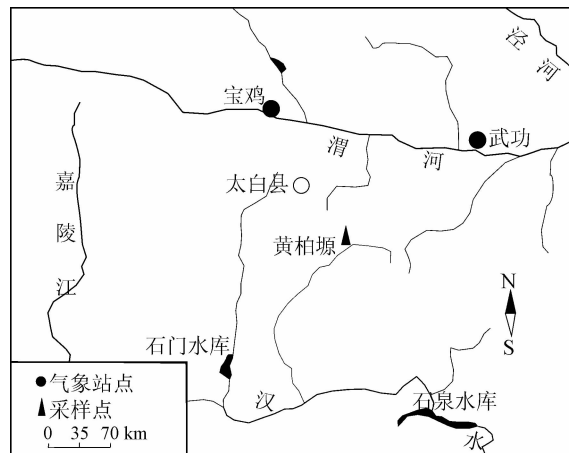


图1 采样点和气象站点示意图

Fig. 1 Location of the sampled sites and meteorological stations

所采样本自然干燥后按照基本程序进行固定、磨光处理后(Cook and Kairiukstis, 1990)并进行交叉定年(Fritts, 1976),初步给定每一年轮日历年龄。在测量精度为0.01 mm的LINTAB宽度仪上完成所有年轮的宽度测量。交叉定年的准确性及年轮宽度测量的结果通过COFECHA软件程序(Holmes, 1983)进行评估。通过COFECHA质量检验的所有年轮宽度序列进一步通过ARSTAN程序(Cook, 1985)合成年表。本文采用负指数函数或直线拟合每个测量序列的生长趋势,用加权平均法将去趋势序列合并成树轮STD年表。可靠年表的起始时间采用子样本信号强度统计值(Sub-sample signal strength, SSS)来确定(Wigley et al, 1984),本文采用SSS>0.80为标准。年表的统计特征值,如所有树芯宽度测量序列间相关系数(r)、平均敏感度(MS),共同区间(1919—2004)的统计值样本总体代表性(EPS)、第一主成分所解释方差量(PCI)和信噪比(SNR)列入表1。

表1 树轮年表统计值及共同区间分析

Table 1 Statistics of the tree-ring STD chronology and common interval analysis (1919—2004)

r	MS	EPS	PCI	SNR	SSS>0.80(树)	SSS>0.85(树)
0.44	0.21	0.88	21.68%	7.13	1898(12)	1901(16)

利用树轮宽度指数和气候要素间的相关函数来分析各气候要素对太白山地区油松径向生长的影

响,进而确定树木生长的气候限制因子。我们将太白山树轮宽度指数与秦岭南坡镇安地区(Liu et al, 2009)、四川九寨沟地区(宋慧明等,2007)树轮宽度分别重建的冬半年温度重建结果进行对比,同时将树轮指数、武功气象站气温观测值与 CRU TS3.1 格点数据的 1—3 月平均最低气温进行了空间相关分析(<http://climexp.knmi.nl>),来探讨太白山地区树轮宽度指数对 1—3 月平均最低气温的空间指示意义。

1.2 气候数据

从采样点附近可获得宝鸡(107°08'E, 34°21'N, 海拔 612.4 m, 1951 年 4 月—2004 年)和武功(108°13'E, 34°15'N, 海拔 447.8 m, 1954 年 4 月—2011 年)两个气象站(图 1)的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量和月相对湿度共五项数据。两站的多年气象记录表明研究区较大范围气温、降水年内分布基本一致(图 2)。

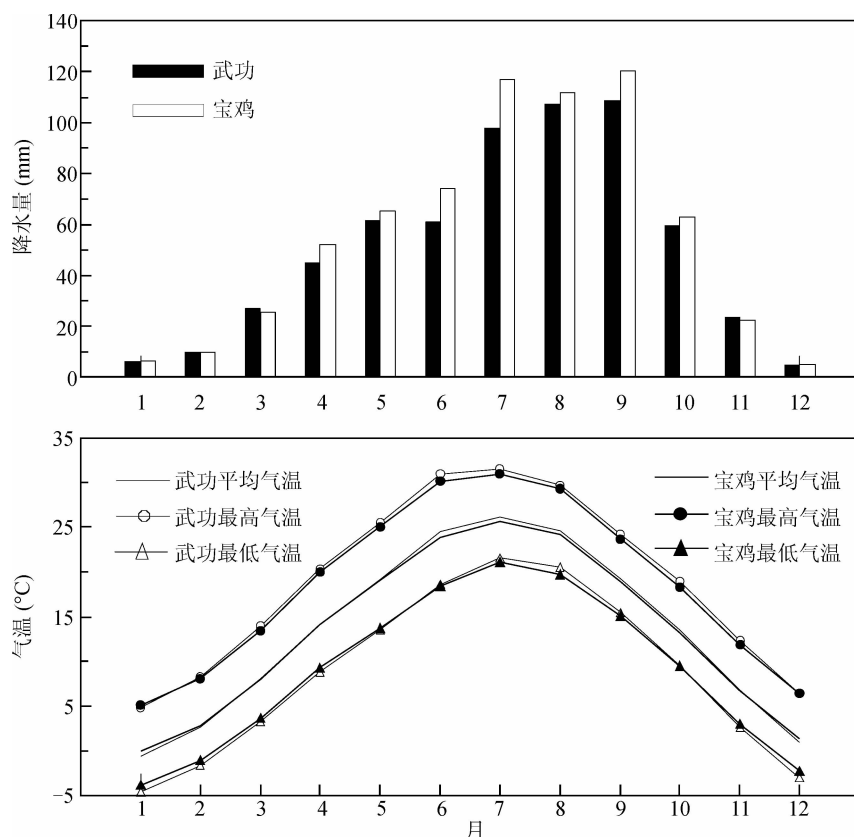


图 2 宝鸡、武功气象站多年月平均降水量、气温分布

Fig. 2 Monthly mean temperature and precipitation of Baoji and Wugong meteorological stations

2 结果与讨论

太白山树轮宽度年表长 174 年(1837—2010)(图 3),按 $SSS > 0.80$ 的标准,其可靠时段为 1898—2010 年,当 $SSS > 0.85$ 时,可靠年表时段为 1901—2010 年。研究区属于半湿润区,组建该年表的所有树轮序列间相关系数为 0.44,平均敏感度为 0.21。先前研究也表明,在半湿润区,树轮宽度序列间的相关系数总体较干旱半干旱区低(邵雪梅和范金梅,1997;Liu et al, 2009)。在共同区间(1919—2004 年)内,样本总体代表性(EPS)为 0.88、信噪比(SNR)为 7.13,第一主成分所占方差为 21.68%,表明年表可靠,可用来进行进一步分析。

相关分析结果见图 4。树轮宽度指数与两气象站气候要素的响应相近,其中,树轮宽度指数仅与宝鸡和武功气象站 4 月的降水量显著负相关,相关系数分别为 -0.29 和 -0.33 ,超过了 95% 的置信度。另外,宝鸡站上年 11 月的降水量与树轮宽度指数也显著相关($r = -0.33$, $p < 0.05$),可归于气候对树木生长的滞后影响(Fritts, 1976),这也由树轮年表较高的一阶自相关系数(0.86)反映出来。树轮宽度指数与相对湿度的响应与降水基本一致,也仅与 4 月份的相对湿度显著负相关(图略)。树轮宽度指数与三个气温要素(月平均、月平均最高、月平均最低)的响应基本一致,与月平均气温和月平均最低气温的相关更为显著。主要和 1 月、2 月和 4 月的

气温显著正相关(表2)。不同季节组合后,树轮宽度指数与1—3月的平均最低气温相关最高,与宝鸡站相关系数为0.44,与武功站达到0.48,均超过99%的置信度。

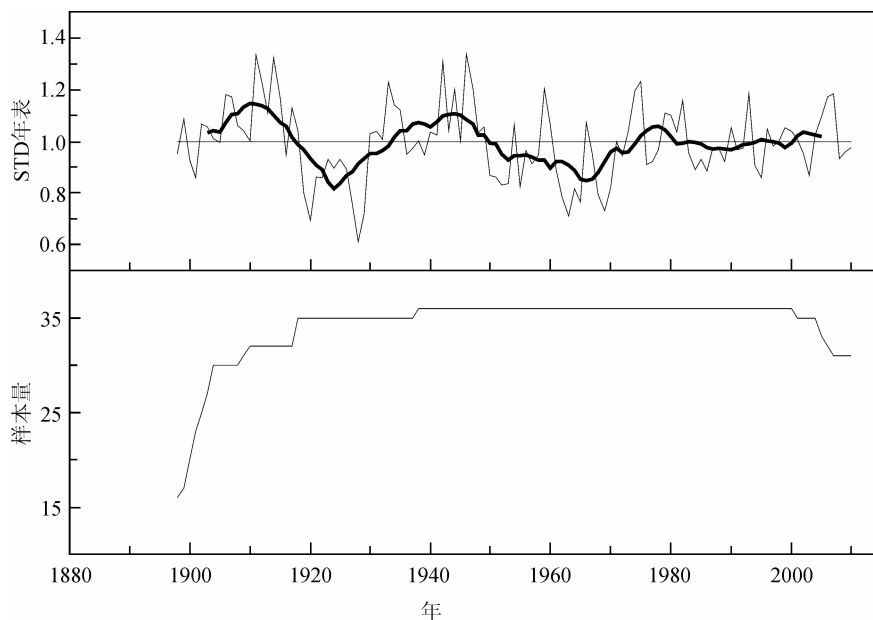


图3 树轮 STD 年表及相应时段样本量

Fig. 3 The tree-ring STD chronology and corresponding sample size

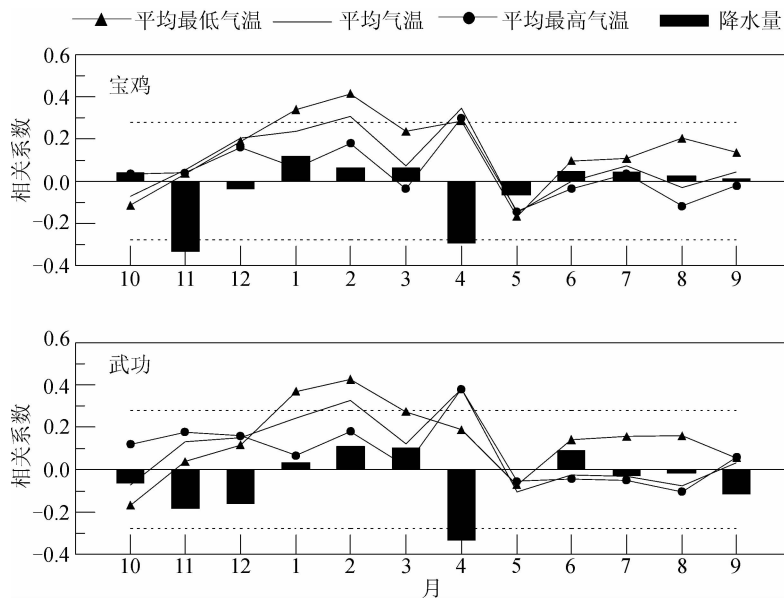


图4 树轮宽度指数与气候要素的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between the tree-ring chronology and climatic factors

树木年轮生长与冬半年温度的正相关关系在许多前人研究中也有报道,如 Zhu et al (2009) 在东北长白山地区、Liu et al (2009) 在秦岭南坡镇安地区、史江峰等 (2009) 在秦岭东缘伏牛山地区的研究。

在本研究中,树轮宽度指数与大部分月份的气

温呈正相关关系,而与降水呈负相关关系。这种树木径向生长对气候要素的响应方式与干旱半干旱区 (Cai et al, 2012) 完全相反,表明半湿润区丰富的降水量能够完全满足树木生长的需求,个别月份过分的降水甚至会抑制树木的径向生长(如4月降水)。而生长季前期冬春季气温高,尤其是最低气

温升高,有利于土壤温度升高并促使树木根系提早复苏传输养料,甚至会提前树木的生长季,即研究区生长季前期温度越高,则当年形成的年轮越宽,反之则形成较窄年轮。

表2 树轮宽度指数与气温要素的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between the tree-ring chronology and climatic factors

	宝鸡		武功	
	最低气温	平均气温	最低气温	平均气温
上年12月	0.19	0.20	0.12	0.15
1月	0.34*	0.24	0.37**	0.24
2月	0.41**	0.31*	0.43**	0.33*
3月	0.23	0.0713	0.27*	0.12
4月	0.29*	0.35*	0.19	0.38**
12—4月	0.40**	0.39**	0.43**	0.40**
12—2月	0.45**	0.36**	0.43**	0.35**
1—4月	0.38	0.36**	0.46**	0.40**
1—3月	0.44**	0.30*	0.48**	0.33*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

上述分析表明,冬春季平均最低气温是太白山地区树木生长的主要气候限制因子。由于本文所选用的两个气象站距离采样点均一百公里以上,且采样点和气象站点海拔相差较大,虽然相关系数还达不到重建要求,但树轮宽度指数可以用来指示冬春季节(1—3月)的平均最低温度变化。在1898—2010年这113年里,太白山地区冬春季最低温度经历了2次较暖的高温时期(1906—1914, 1933—1947)和2次较冷的低温时期(1920—1929, 1950—1970)。经历过最后一个冷期后,太白山地区1—3月平均最低气温呈缓慢上升趋势,目前似乎还处于上升过程中。本文树轮宽度指数指示的两个冷期和两个暖期均可与宋慧明等(2007)在四川九寨沟和 Liu et al (2009)在秦岭中部南坡镇安(图5)的冬半年温度重建序列中的冷暖期对比,表明了秦岭地区较大范围冬半年温度变化的一致性。

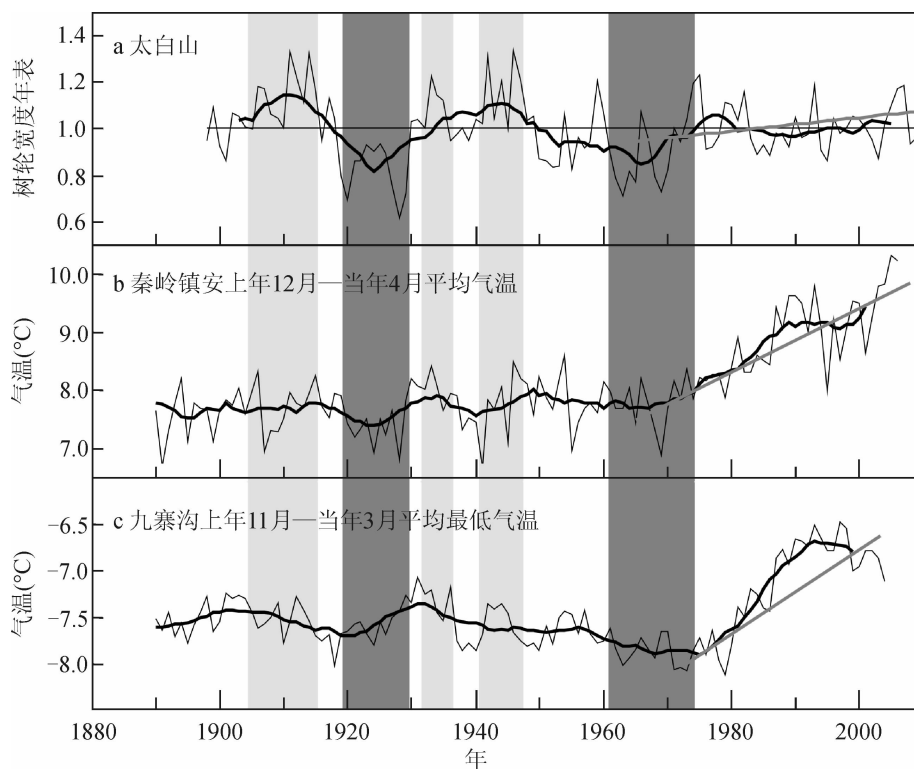


图5 (a)太白山树轮宽度年表与(b)秦岭镇安(Liu et al, 2009)、
(c)四川九寨沟(宋慧明等,2007)冬半年温度重建结果对比

Fig. 5 (a) Comparisons between the tree-ring STD chronology from Taibai Mountain and the tree-ring based winter-half year temperature reconstructions from (b) Zhen an, Qinling Mountains (Liu et al, 2009), (c) Jiuzhai, Sichuan Province (Song et al, 2007)

值得一提的是,上世纪60年代初期以来太白山1—3月平均最低气温虽然处于上升趋势,

但是其增温幅度远不如四川九寨沟地区(宋慧明等,2007)和秦岭南坡镇安地区(Liu et al, 2009)。

与 CRU 格点数据空间相关分析表明,太白山树轮宽度指数与我国大范围地区 1—3 月平均最低气温都存在显著正相关(1951—2009)(图 6a),相关最显著的区域位于研究区、其东北部的

黄土高原及我国东南沿海一带。进一步分析武功(图 6b)、宝鸡(与武功相似,图略)气象站 1—3 月平均最低气温与同期 CRU 格点数据的空间相关,仍发现研究区 1—3 月平均最低气温与全国大范围 1—3 月平均最低气温均显著相关,证明太白山树轮宽度反映的 1—3 月平均气温变化可靠,且指示范围更广。

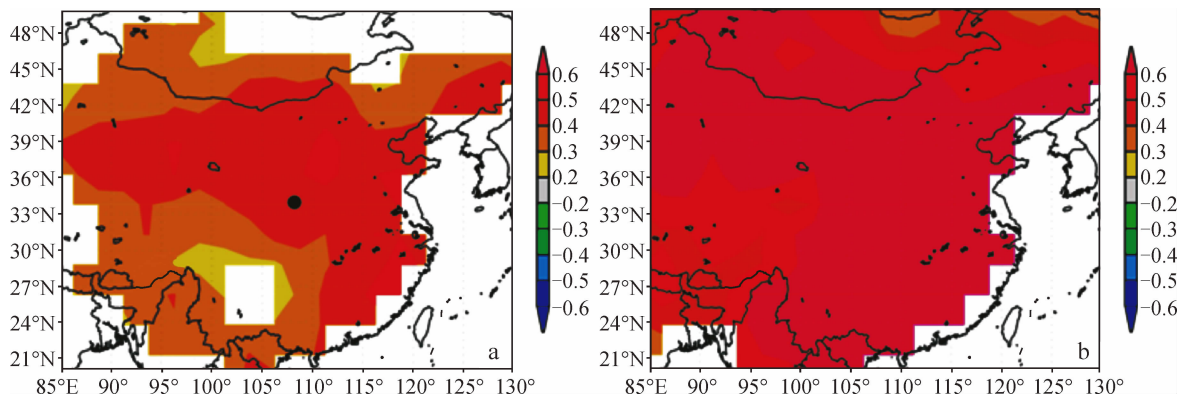


图 6 (a)太白山树轮宽度年表(1951—2009 年)、(b)武功 1—3 月平均最低气温观测记录(1955—2009 年)与 CRU TS3.1 格点数据 1—3 月平均最低气温的空间相关分析(●为本文研究地点)

Fig. 6 (a) Spatial correlations between the tree-ring STD chronology (1951—2009), (b) the January-March mean minimum temperature (1955—2009) and January-March gridded dataset (the black dot is our study site)

3 结论

建立了太白山地区一条长达 113 年的油松树轮宽度年表。统计相关分析表明,该树轮年表可以用来指示 1—3 月平均最低气温变化。在过去 113 年里,研究区冬春季最低气温共出现 2 次较暖时期(1906—1914, 1933—1947)和 2 次低温时期(1920—1929, 1950—1970),这些高、低温时段与研究区周边其他地区树轮重建的气温序列中的高、低温时段一致,自 1960 年代以来研究区冬春季最低气温呈缓慢上升趋势。空间相关分析显示太白山树轮宽度年表与我国大范围的 1—3 月平均最低气温都显著相关,尤其是我国黄土高原和东南沿海地区,进一步表明该树轮宽度年表对研究区及周边较大范围的 1—3 月平均最低气温都有一定的指示意义。

参考文献

戴君虎,邵雪梅,崔海亭,等. 2003. 太白山树木年轮宽度资料对过去生态气候要素的重建[J]. 第四纪研究, 23(4): 428—435. [Dai J H, Shao X M, Cui H T, et al. 2003. Reconstruction of past eco-climate by tree-ring width

index of *Larix Chinensis* on Mt. Taibai [J]. *Quaternary Sciences*, 23(4): 428—435.]

刘禹,田沁花,宋慧明,等. 2009. 以树轮宽度重建公园 1558 年以来华山 5—6 月平均温度及 20 世纪中后期升温[J]. 第四纪研究, 29(5): 888—895. [Liu Y, Tian Q H, Song H M, et al. 2009. Tree-ring width based May—June mean temperature reconstruction for Huashan Mountain science A. D. 1558 and 20th century warming [J]. *Quaternary Sciences*, 29(5): 888—895.]

邵雪梅,范金梅. 1999. 树轮宽度资料所指示的川西过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1: 81—89. [Shao X M, Fan J M. 1999. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of Dragon spruce [J]. *Quaternary Sciences*, 1: 81—89.]

邵雪梅,吴祥定. 1994. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 49(2): 174—181. [Shao X M, Wu X D. 1994. Tree-ring chronologies for *Pinus Armandi* Franch from Huashan, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 49(2): 174—181.]

宋慧明,刘禹,倪万眉,等. 2007. 以树轮宽度重建九寨沟公元 1750 年以来冬半年平均最低温度[J]. 第四纪研究, 27(4): 486—491. [Song H M, Liu Y, Ni W M, et al. 2007. Winter mean lowest temperature derived from

- tree-ring width in Jiuzhaigou region, China since 1750 A. D. [J]. *Quaternary Sciences*, 27(4): 486–491.]
- Adams R M, Hurd B, Lenhart S, et al. 1998. The effects of global warming on agriculture: An interpretative review [J]. *Journal of Climate Research*, 11: 19–30.
- Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility [J]. *Science*, 331: 578–582.
- Cook E R. 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization[D]. Tucson: University of Arizona.
- Cook E T, Kairiukstis L A. 1990. Methods of Dendrochronology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1–394.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium [J]. *Science*, 328: 486–489.
- Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. 2002. Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability [J]. *Science*, 295: 2250–2253.
- Fritts H C. 1976. Tree Rings and Climate[M]. New York: Academic Press.
- Holmes R L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–75.
- Hughes M K, Wu X D, Shao X M, et al. 1994. A preliminary reconstruction of rainfall in north-central China since A. D. 1600 from tree-ring density and width [J]. *Quaternary Research*, 42: 88–99.
- IPCC. 2007. IPCC Fourth Assessment Report (AR4) [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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
- Liu Y, Linderholm W H, 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, Zhang Z H, Hughes M K, et al. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia [J]. *PNAS*, 105(36): 13252–13257.
- Walther G R. 2010. Community and ecosystem responses to recent climate change [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-Series B: Biological Sciences*, 365(1549): 2019–2024.
- Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. 1984. On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23: 201–213.
- Zhu H F, Fang X Q, Shao X M, et al. 2009. Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon [J]. *Climate Past*, 5: 661–666.