应用生态学报 2020年2月 第31卷 第2期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Feb. 2020, 31(2): 381-387 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202002.026

基于油松树轮重建陕西省镇安县165年以来3—4月平均最高气温

华亚伟 张红娟 刘 康*
(西北大学城市与环境学院/陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘 要 采集木王国家森林公园的油松树轮样芯,建立树轮宽度标准化年表(STD),与镇安气象站的气候因子进行相关分析,利用线性回归分析重建了镇安县1853—2017年(165年)3—4月平均最高气温。结果表明:树轮序列与3—4月平均最高气温相关性最大($r=0.596$, $n=60$, $P<0.01$)。3—4月平均最高气温重建方程的方差解释量为33.2%,重建方程稳定可靠,结果可信。重建序列中偏暖年份出现25次,偏冷年份出现29次,偏暖年份较多地伴随着洪涝事件,偏冷年份较多地伴随着干旱事件。重建序列存在明显的冷暖变化,存在2个偏冷时期(1902—1917年、1953—2000年)、4个偏暖时期(1868—1892年、1917—1937年、1941—1953年、2001—2012年)。重建序列有明显的2~7、8~15、18~28、75~96、100~125年周期变化特征,其中准113、88、22年的周期变化分别为时段内的第一、第二及第三主周期,这些周期性变化可能与太阳活动、季风和厄尔尼诺-南方涛动的变化存在一定的关系。

关键词 油松;气候变化;树木年轮宽度;气候响应;气候重建

Reconstruction of the March-April average maximum air temperature over 165 years based on *Pinus tabuliformis* tree-rings of Zhen'an County, Shaanxi Province, China.

HUA Ya-wei, ZHANG Hong-juan, LIU Kang* (*College of Urban and Environmental Science, Northwest University/Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an* 710127, *China*).

Abstract: We used tree rings of *Pinus tabuliformis* sampled in the Muwang National Forest Park to establish a standardized chronology (STD) and calculated the correlation coefficients between the standardized chronology and climatic factors of Zhen'an meteorological station. With linear regression analysis, we reconstructed the March-April mean maximum temperature of Zhen'an over 165 years from 1853 to 2017. The highest correlation coefficient was observed between the standardized chronology and the March-April mean maximum temperature ($r=0.596$, $n=60$, $P<0.01$). The variance interpretation of the March-April mean maximum temperature reconstruction function was 33.2%, and the reconstruction function and results were credible and reliable. Warm years occurred 25 times and cold years occurred 29 times in the reconstruction sequence. The warm years were more accompanied by flood events, while the cold years were accompanied by more drought events. Temperature fluctuated obviously in the reconstruction sequence, with two cold periods (1902-1917 and 1953-2000) and four warm periods (1868-1892, 1917-1937, 1941-1953 and 2001-2012). The obvious periodic variations of 2-7, 8-15, 18-28, 75-96, and 100-125 years were found in the reconstruction sequence, in which the quasi-113, 88 and 22 years were the first, second and third main periods, respectively. These variations might potentially be the fingerprints of some climate change forces such as solar activity, monsoon and EI Niño-Southern Oscillation (ENSO) activity.

Key words: *Pinus tabuliformis*; climate change; tree ring-width; climate response; climate reconstruction.

本文由国家林业公益性行业科研专项(201304309)资助 This work was supported by the Special Project for Scientific Research of the National Forestry Public Welfare Industry (201304309).
2019-10-08 Received, 2019-12-12 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuk63@126.com

作为全球变化的重要组成部分之一的气候变化已经成为了世界各国关注的热点。气候变化对陆地生态系统,尤其是森林生态系统的功能和结构已经产生了很大的影响,森林生态系统对气候变化的响应已经成为了一个倍受关注的问题。树木作为森林最重要的组成部分之一,生长情况不仅受本身的遗传因素影响,在很大程度上还取决于其立地环境,并且因气候条件的变化而有所不同。树轮作为树木每一年通过光合作用积累下来的有机物的集合,其每轮的产生都是多个生态因子综合作用于树木生长过程的结果[1]。在消除了本身遗传因素所产生的生长趋势以及其他非气候要素影响后,树木年轮指数保留大量的历史气候信息。此外,树木年轮具有分辨率高(年分辨率)、连续性强、定年准确等优点[2]。目前,树木年轮已经作为一种重要的材料用于研究气候的变化。

秦岭是中国南北气候的分界线,其以北区域气候相对干燥,以南区域气候相对温暖湿润,是研究气候变化的热点区域[3-4],对其进行历史时期的气候变化研究具有重大的意义。有研究表明,秦岭分水岭[5]和南坡[6-8]地区树木生长的控制因子以温度为主,北坡地区水分为树木生长的主要限制因子[9-11],东部地区树木生长对气温和水分的响应存在差异,对气温的响应程度更高[12-15]。刘禹等[16]根据冷杉(*Abies chensiensis*)树轮宽度重建了过去 251 年陕西镇安地区 3—4 月平均气温序列,发现 3—4 月平均气温可视为当年出现旱涝灾情的预警信号。刘洪滨等[3]利用冷杉树轮年表重建了陕西镇安 1755 年来的初春平均温度,发现该地区的初春温度序列有显著的准 2~3 年和准 50 年的变化周期。关于镇安地区的气温重建主要集中在平均气温的重建,使用的材料主要为较高海拔区的冷杉,尚未见利用油松(*Pinus tabuliformis*)重建历史时期的平均最高温的研究报道。

本研究采集秦岭南坡中段镇安县木王国家森林公园的油松树轮,建立标准化年表(STD),并与镇安气象站的气候因子进行相关分析,研究油松树轮的生长和气候因子的关系,并对镇安历史时期的气候因子进行了重建,为秦岭镇安地区百年来气候变化研究提供高分辨率的气候资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区处于陕西省镇安县西部的木王国家森林公园(33°23′34″ N,108°36′44″ E),位于秦岭的南坡中段,汉江的支流旬河上游,地势西高东低,海拔 1200~2602 m。该地区位于北亚热带季风性半湿润气候区,四季冷暖分明,冬夏长而春秋短,雨热同期。根据镇安气象站实测资料(1958—2018 年),年降水量 786 mm,5—9 月降水量占全年总降水量的 72.6%,其中 7 月平均降水量最多,为 151 mm,1 月最少,为 5.7 mm;多年平均气温 13.2 ℃,7 月最高,为 24.3 ℃,1 月最低,为 1.5 ℃;多年平均日照时数 1885 h,其中 7 月最高,为 206 h,2 月最低,为 118 h。

1.2 样本采集与年表建立

2018 年 7 月于木王国家森林公园的双头马景区(33°23′34″ N,108°36′44″ E,2100 m)(图 1)采集油松样芯,油松位于坡度较陡地段,受人为干扰较小且发育较好。根据国际树轮数据库(ITRDB)的标准,使用生长锥从每棵树 1.3 m 高的不同方位上取 2 个样芯,共采集 31 棵树,得到 62 个样芯。

依照 Stokes 等[17]的方法对采集的树芯进行预处理,使用骨架法[18]对样芯进行标注、样芯间年轮宽窄特征比对和交叉定年。利用 LINTAB 年轮宽度测量仪在 0.01 mm 水平上测定轮宽,而后用 COFECHA 对测量结果进行检验,最后保留 30 棵树 55 个样芯用于构建年表。利用 ARSTAN 程序的负指数函数对树轮宽度数据进行去趋势和标准化,最终得到 3 种树轮年表:差值年表、自回归年表及标准化年表,选取标准化年表进行相关研究。

1.3 气象资料

镇安气象站(33°15′36″ N,109°05′24″ E,海拔 694 m)的气候数据下载于中国气象数据共享网站(http://data.cma.cn/),时间段为 1958—2018 年,包括气温及降水量的逐月观测数据(图2),其中有一

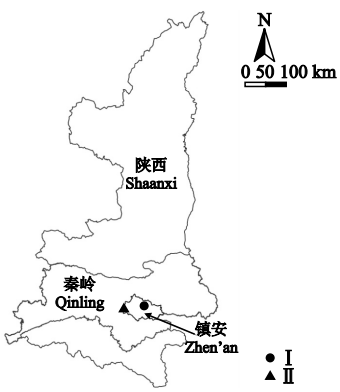


图 1 采样点(Ⅰ)与气象站(Ⅱ)分布

Fig.1 Distribution of sampling sites (Ⅰ) and meteorological stations (Ⅱ).

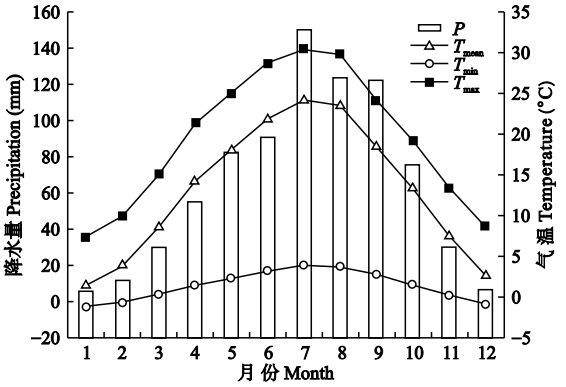


图 2　镇安气象站 1958—2018 年气象数据

Fig.2　Meteorological data from the Zhen' an meteorological station from 1958 to 2018.

P：平均降水量 Average precipitation；T_{mean}：平均气温 Average temperature；T_{min}：平均最低气温 Average minimum temperature；T_{max}：平均最高气温 Average maximum temperature.

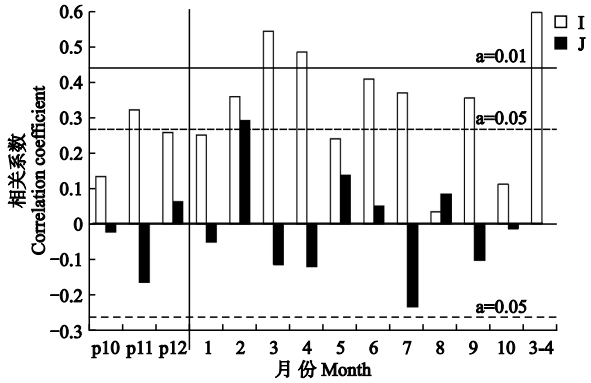


图 3　标准化年表与气候因子的相关系数

Fig.3　Correlation coefficients between the standardized chronology and climatic factors.

p：上年 Previous year. I：标准化年表与月平均最高温的相关系数 Correlation coefficient between the standardized chronology and monthly average maximum temperature；J：标准化年表与月降水量的相关系数 Correlation coefficient between the standardized chronology and monthly average precipitation.

小部分数据缺测，缺测值用对应时期的多年平均值代替。考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响，所用气候资料为前一年 10 月到当年 10 月的月平均气温、月平均最低温、月平均最高温和月降水量。

1.4　研究方法

利用 Dendroclim 2002 及 SPSS 22.0 软件，运用响应函数和相关函数分析标准化年表值与镇安气象站 1958—2017 年气候因子的相关关系。运用一元线性回归分析，建立重建方程。采用逐一剔除法[19]对重建方程进行交叉检验来确定方程的稳定性和可靠性。计算重建序列的平均值以及 11 年滑动平均值，并规定连续 11 年以上滑动平均值小于平均值的阶段为冷期，连续 11 年以上滑动平均值大于平均值的阶段为暖期[20]，以此标准划分镇安地区 1853—2017 年的冷暖时段。通过 Morlet 连续复小波变换来分析重建序列的周期性。

2　结果与分析

2.1　年表特征统计值分析

年表的统计特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表包含环境信息的多少，一些重要指标直接决定年表的质量及使用价值[21]。由表 1 可以看出，本研究所使用的标准化年表的总体代表性大于 0.85 的最低阈值，平均敏感度、信噪比等也处于较高水平，这都表明研究使用的标准化年表具有较高的可信度，能够较好地反映当地气候变化，适用于相关研究。

2.2　树轮宽度标准化年表与气候因子的相关分析

标准化年表与月平均最高温的相关性较好，本研究选取标准化年表与月平均最高温、月降水量的相关性进行分析。由图 3 可以看出，在 95%的置信水平下，标准化年表与上年11月及当年2—4月、

表 1　年表统计特征及公共区间(1910—2017)分析

Table 1　Chronology statistics and the results of common interval analysis (1910-2017)

年表统计项 Chronology statistics item	数值 Value	公共区间分析 Common interval analysis	数值 Value
年表研制样本量(树/芯) Sampling cores in chronologies (tree/core)	30/55	公共区间 Common interval	1910-2017
序列长度 Time span	1853-2017	所有样芯平均相关系数 Mean correlation coefficient among all series	0.23
指数均值 Mean index	0.98	树间平均相关系数 Mean correlation coefficient between trees	0.22
标准差 Standard deviation	0.15	树内平均相关系数 Mean correlation coefficient within trees	0.52
平均敏感度 Mean sensitivity	0.23	信噪比 Signal-to-noise ratio	10.43
一阶自相关系数 First-order autocorrelation coefficient	0.50	总体代表性 Expressed population signal	0.91
		第一主成分解释量 First principal component interpretation	0.26

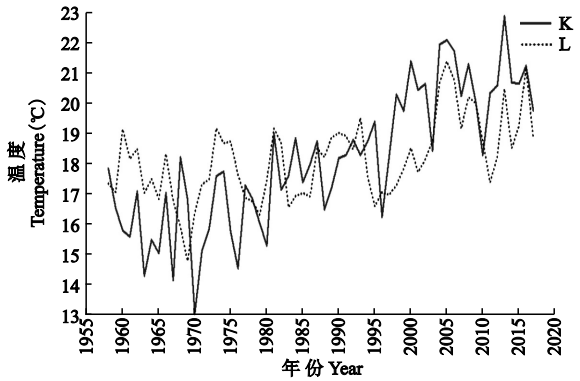


图 4 3—4 月平均最高温的实测序列(K)与重建序列(L)

Fig.4 Measured sequence (K) and reconstruction sequence (L) of the March-April mean maximum temperature.

6—7 月、9 月的月平均最高气温呈显著正相关,有且仅与当年 2 月的降水量呈显著正相关,与当年 3—4 月的平均最高气温的相关系数最大(r = 0.596, n = 60, P<0.01),说明温度是该地区油松径向生长的主要限制因子。

2.3 镇安 3—4 月平均最高气温的重建和检验

选取 3—4 月平均最高温作为重建对象,运用一元线性回归分析得到回归方程(1),并绘制实测序列与重建序列对比图(图 4)。

$$T_i = 8.216W_i + 10.326 \quad (1)$$

式中:T_i为第 i 年 3—4 月的平均最高温;W_i为第 i 年的标准化年表值。重建方程(1)的方差解释量为 33.2%,调整后的解释方差为 32.0%,F 值为 28.79,系数值及常数值均通过了 0.01 的显著性水平检验,说明重建方程具有一定的可信度。

方程的稳定性直接影响重建序列的质量,采用逐一剔除法对重建方程的稳定性和可靠性进行检验。检验统计量包括相关系数、乘积平均数、符号检验等[21]。由表 2 可以看出,实测序列与重建序列的符号检验值(原序列符号检验、一阶差符号检验)、相关系数及乘积平均数都达到了 0.01 的显著性水平,误差缩减值大于 0.3,说明重建序列较好地通过了检验,重建方程是稳定可靠的。

2.4 镇安 3—4 月平均最高温重建序列波动特征

由图 5 可以看出,镇安地区 3—4 月平均最高温上下波动明显,在 20 世纪末期呈现明显上升趋势。重建序列的最高值和最低值分别为 21.39 ℃(2005 年)和 14.79 ℃(1969 年),多年平均值(T_{mean})为 18.40 ℃,略高于实测期的平均值(18.15 ℃),标准差(σ)为 1.23 ℃。

本研究中,将气温大于 $T_{mean}+1\sigma$(19.63 ℃)的年份定义为高温年份,将气温小于 $T_{mean}-1\sigma$(17.17 ℃)的年份定义为低温年份,将气温处于 17.17~19.63 ℃的年份定义为正常年份。从表3可以看

表 2 重建方程的统计检验

Table 2 Statistical crossing-test characters of the equations reconstructed

统计项 Statistics item	数值 Value
相关系数 Correlation coefficient	0.54**
一阶差相关系数 First-order correlation coefficient	0.27*
误差缩减值 Reduced error	0.69
乘积平均数 Product mean mean	7.18**
原序列符号检验 Original sequence signal test	35+/25-**
一阶差符号检验 First-order signal test	31+/28-**

*P<0.05; **P<0.01.

表 3 3—4 月平均最高温重建序列统计特征

Table 3 Statistical characteristics of the reconstructed March-April mean maximum temperature sequence

序号 Serial number	偏暖年份 Warmer year	重建值 Reconstruction value (℃)	偏冷年份 Colder year	重建值 Reconstruction value (℃)
1	1854	20.17	1853	17.15
2	1859	20.70	1857	16.73
3	1860	21.27	1862	16.09
4	1871	20.27	1876	16.86
5	1881	19.78	1877	17.12
6	1882	19.68	1891	16.04
7	1887	21.05	1899	16.60
8	1888	19.85	1907	16.67
9	1902	19.89	1910	17.12
10	1903	20.05	1941	16.82
11	1929	20.70	1945	17.14
12	1930	20.55	1955	15.88
13	1931	19.99	1959	17.06
14	1932	19.84	1963	17.05
15	1933	20.11	1965	16.84
16	1946	20.38	1967	16.78
17	1947	20.09	1968	15.91
18	1954	19.67	1969	14.79
19	2004	20.70	1970	16.40
20	2005	21.39	1977	16.88
21	2006	20.79	1978	16.77
22	2008	20.21	1979	16.32
23	2009	20.01	1983	16.56
24	2013	20.49	1984	16.95
25	2016	21.20	1985	17.04
26			1986	16.92
27			1995	16.60
28			1996	17.06
29			1997	16.98

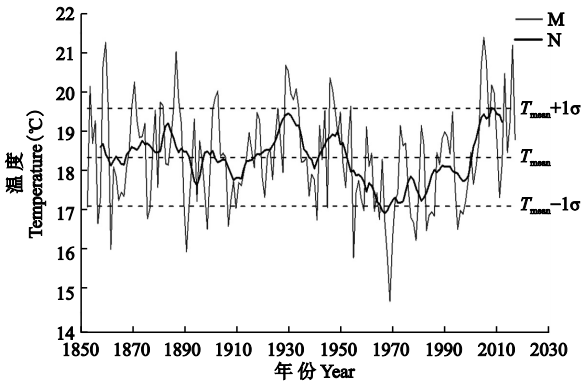


图 5　3—4 月平均最高温重建序列及 11 年滑动平均

Fig.5　Reconstructed March−April mean maximum temperature sequence and 11-year moving average curve.

M：重建值 Reconstruction value；N：11 年滑动平均值 11-year moving average value.

出，镇安地区 165 年来偏暖年份共出现 25 次，偏冷年份共出现 29 次，分别占总重建年份的 15.2% 和 17.6%。

由图 5 可以看出，镇安地区 3—4 月平均最高温存在明显的冷暖变化：存在 2 个明显的偏冷时期，分别为 1902—1917 年、1953—2000 年，总持续时间为 64 年；4 个明显的偏暖时期，分别为 1868—1892 年、1917—1937 年、1941—1953 年、2001—2012 年，总持续时间为 71 年；其他时段的平均最高温在平均值附近波动，变化较小。

2.5　镇安 3—4 月平均最高温重建序列变化周期

由图 6 可以看出，重建序列有明显的 2～7、8～15、18～28、75～96、100～125 年的周期变化特征。在 100～125 年的时间尺度上存在 1 个震荡周期，在 75～96年时间尺度上存在 2 个震荡周期，在 18～28 年的时间尺度上存在11个震荡周期，在2～7年的

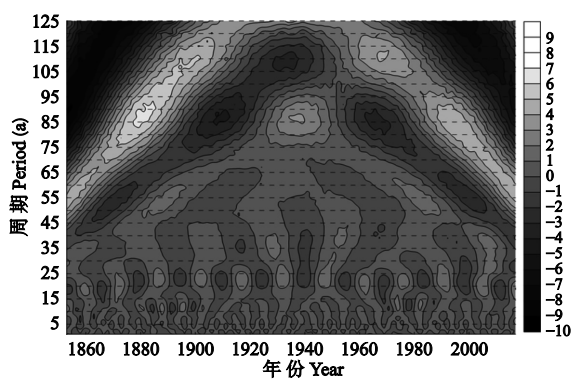


图 6　3—4 月平均最高温重建序列的小波系数实部等值线图

Fig.6　Contour map of the real part of wavelet coefficients of the reconstructed March − April mean maximum temperature sequence.

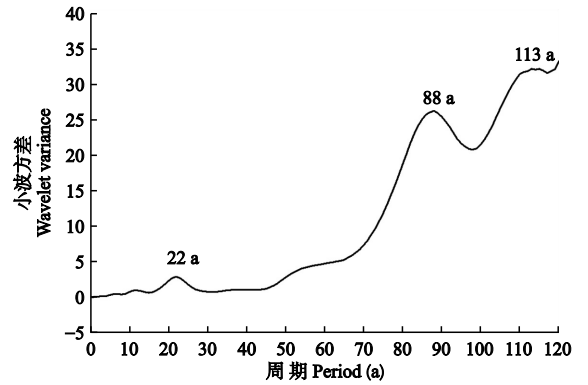


图 7　3—4 月平均最高温重建序列的小波方差

Fig.7　Wavelet variance of the reconstructed March−April mean maximum temperature sequence.

时间尺度上存在不规律的周期震荡。由图 7 可以看出，重建序列中存在明显的准 113、88、22 年的周期变化分别为时段内的第一、第二及第三主周期。

3　讨　　论

水热条件是影响树木生长的主要因素，在湿润和半湿润的中高山地区，气温对树木生长的影响更为突出，降水次之。本研究中，标准化年表与气候因子的相关分析表明，温度是该地区油松生长的主要限制因子，其中 3—4 月平均最高温与标准化年表的相关系数最高，且呈显著正相关。这与秦岭华山松（*Pinus armandii*）[14]、冷杉（*Abies fabri*）[3]、早材最小密度[22]所揭示的 3—4 月气温是秦岭地区生长季的显著限制因子的结果基本一致。由于研究区气候较为湿润，初春温度往往是该地区树木前期生长的重要限制因子。初春季节是油松早材形成的重要时期，3—4 月较高的气温可以引起树木形成层活动提前[23]，有利于延长油松的生长季和形成较宽的早材年轮，对 3—4 月平均最高温进行重建具有生物学意义。

镇安 3—4 月平均最高温重建序列与实测序列的同步性较好，但年际变化在某些时段存在差别，可能是由于多种因子同时作用于树木生长的结果，使 3—4 月平均最高温重建结果的精度受到影响。此外，气象站实测气温与山地环境的实际气温存在一定差异，从而影响年表与温度的相关系数，导致重建方程具有较小的方差解释量以及重建值对高温、低温的响应偏低。

为了进一步验证 3—4 月平均最高温重建序列的可靠性，本研究对比了重建的 3—4 月平均最高温序列与重建的过去 251 年陕西镇安地区 3—4 月平

均气温序列[16]、重建的陕西镇安 1755 年以来的初春平均温度序列[3]。结果发现,3 个重建序列的波动特征具有一定的一致性,反映了该地区油松和冷杉对气候响应的一致性,说明重建的镇安 3—4 月平均最高温序列具有一定的可靠性。此外,本研究对比了重建的 3—4 月平均最高温序列与镇安县近 200 年的旱涝灾害记录(http://www.sxsdq.cn)。结果发现,偏暖年份较多地伴随着洪涝事件,例如 1882、1930、1931、1932、1933 年记载有“暴雨”、“山洪暴发”、“河水猛涨”、“淹没庄稼和民房”等现象。偏冷年份较多地伴随着干旱事件,例如 1876、1877、1941、1955、1959、1969、1977、1978、1986 年记载有“大旱,收成甚微”、“旱灾”、“秋田受灾减产”、“伏旱成灾,饮水困难”等现象。这与刘禹等[16]对镇安县平均温度与旱涝指数关系的研究结果较为一致,进一步说明了本研究重建的 3—4 月平均最高温具有一定的可靠性。

小波分析发现,重建的镇安 3—4 月平均最高温存在 2~7 年的周期变化,这与 ENSO 的周期变化[24]具有一定的一致性,重建序列 75~96 年的准周期可能与东亚夏季风近 80 年准周期有关[25],重建序列 8~15 年、准 22 年的第三主周期及准 88 年的第二主周期很有可能是太阳准 11 年、准 22 年和准 90 年活动周期[26]的体现。因此,镇安地区 3—4 月平均最高温变化可能与季风、太阳活动和 ENSO 的变化存在一定的关系。

参考文献

[1] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应. 应用生态学报, 2016, **27**(5): 1341-1352 [Liu M, Mao Z-J, Li Y, *et al*. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatic factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1341-1352]

[2] 勾晓华, 邓洋, 陈发虎, 等. 黄河上游过去 1234 年流量的树轮重建与变化特征分析. 科学通报, 2010, **55**(33): 3236-3243 [Gou X-H, Deng Y, Chen F-H, *et al*. Tree ring based streamflow reconstruction for the upper Yellow River over the past 1234 years. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(33): 3236-3243]

[3] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度. 气象学报, 2000, **58**(2): 223-233 [Liu H-B, Shao X-M. Reconstruction of early-spring temperature at Zhen'an from 1755 using tree-ring chronologies. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **58**(2): 223-233]

[4] 陈明荣. 秦岭的气候与农业. 陕西: 陕西人民出版社, 1983: 1-11 [Chen M-R. Climate and Agriculture of Qinling Mountains. Shaanxi: Shaanxi People's Publishing House, 1983: 1-11]

[5] 刘禹, 刘娜, 宋慧明, 等. 以树轮宽度重建秦岭中段分水岭地区 1-7 月平均气温. 气候变化研究进展, 2009, **5**(5): 260-265 [Liu Y, Liu N, Song H-M, *et al*. Reconstructed mean air temperature from January to July at the divide sampling site in the Mid-Qinling Mountains with tree-ring widths. *Advances in Climate Change Research*, 2009, **5**(5): 260-265]

[6] 刘洪滨, 邵雪梅. 利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化. 地理学报, 2003, **58**(6): 879-884 [Liu H-B, Shao X-M. Reconstruction of early-spring temperature of Qinling Mountains using tree-ring chronologies. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(6): 879-884]

[7] 陈兰, 李书恒, 侯丽, 等. 基于 Vaganov-Shashkin 模型的太白红杉径向生长对气候要素的响应. 应用生态学报, 2017, **28**(8): 2470-2480 [Chen L, Li S-H, Hou L, *et al*. Response of *Larix chinensis* radial growth to climatic factors based on the Vaganov-Shashkin model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(8): 2470-2480]

[8] 刘洪滨, 邵雪梅. 秦岭南坡佛坪 1789 年以来 1-4 月平均温度重建. 应用气象学报, 2003, **14**(2): 188-196 [Liu H-B, Shao X-M. Reconstruction of January to April mean temperature at Qinling Mountains from 1789 to 1992 using tree ring chronologies. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, **14**(2): 188-196]

[9] Liu Y, Wang YC, Liu Q, *et al*. Tree-ring stable carbon isotope-based May-July temperature reconstruction over Nanwutai, China, for the past century and its record of 20th century warming. *Quaternary Science Reviews*, 2014, **93**: 67-76

[10] Chen F, Yuan YJ, Wei WH, *et al*. April-June precipitation reconstruction for Xi'an and drought assessment for the Guanzhong Plain from tree rings of Chinese pine. *Journal of Water and Climate Change*, 2015, **6**: 638-646

[11] 王红桃, 包光. 秦岭及周边地区树木径向生长与气候因子的关系研究进展. 亚热带资源与环境学报, 2016, **11**(1): 52-58 [Wang H-T, Bao G. Advances in studies of relationships between tree radial growth and climatic factors in Qinling Mountains and the surrounding areas. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, **11**(1): 52-58]

[12] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 油松树轮记录的过去 134 年伏牛山 5-7 月平均最高温度. 地理学报, 2009, **64**(7): 879-887 [Tian Q-H, Liu Y, Cai Q-F, *et al*. The maximum temperature of May-July inferred from tree-ring in Funiu Mountain since 1874 AD. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(7): 879-887]

[13] Peng JF, Li JB, Wang T, *et al*. Effect of altitude on cli-

mate-growth relationships of Chinese white pine (*Pinus armandii*) in the northern Funiu Mountain, central China. *Climatic Change*, 2019, **154**: 273-288

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

[15] Chen F, Zhang RB, Wang HQ, *et al*. Updated precipitation reconstruction (AD 1482-2012) for Huashan, north-central China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, **123**: 723-732

[16] 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 等. 依据陕西秦岭镇安树木年轮重建 3-4 月份气温序列. 自然科学进展, 2001, **11**(2): 157-162 [Liu Y, Ma L-M, Cai Q-F, *et al*. Reconstruction of March to April temperature using tree ring data of Qinling Mountains, Shaanxi Province. *Progress in Natural Science*, 2001, **11**(2): 157-162]

[17] Stokes MA, Smiley TL. An Introduction to Tree Ring Dating. Chicago: University of Chicago Press, 1968: 1-73

[18] Douglass AE. Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry*, 1941, **39**: 825-831

[19] 朱显亮, 李书恒, 白红英, 等. 基于太白红杉树轮宽度重建近 172 年太白山自然保护区 7 月 NDVI. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2382-2390 [Zhu X-L, Li S-H, Bai H-Y, *et al*. Reconstruction of July NDVI over 172 years based on tree-ring width of *Larix chinensis* in Taibai Mountain Nature Reserve, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2382-2390]

[20] 蔡秋芳, 刘禹, 包光, 等. 树轮记录的吕梁山地区公元 1836 年以来 5—7 月平均气温变化. 科学通报, 2010, **55**(20): 2033-2039 [Cai Q-F, Liu Y, Bao G, *et al*. The average temperature change from May to July since 1836 AD recorded by tree rings in the Lvliang Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(20): 2033-2039]

[21] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 145-264 [Wu X-D, Tree-Ring and Climate. Beijing: Meteorological Press, 1990: 145-264]

[22] 吴祥定, 邵雪梅. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析. 应用气象学报, 1994, **5**(2): 253-256 [Wu X-D, Shao X-M. Preliminary analysis of the response of tree annual ring density to climate in Qinling, China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1994, **5**(2): 253-256]

[23] 侯鑫源, 史江峰, 李玲玲, 等. 湖北神农架巴山冷杉径向生长对气候的响应. 应用生态学报, 2015, **26**(3): 689-696 [Hou X-Y, Shi J-F, Li L-L, *et al*. Growth response of *Abies fargesii* to climate in Shennongjia Mount of Hubei Province, southeastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(3): 689-696]

[24] McPhaden MJ, Zebiak SE, Glantz MH. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 2006, **314**: 1740-1745

[25] 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 [Guo Q-Y, Cai J-N, Shao X-M, *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]

[26] Raspopov OM, Dergachev VA, Kolström T. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, **209**: 127-139

作者简介　华亚伟, 男, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事树木年轮生态学与气候学研究。E-mail: 201720804@stumail.nwu.edu.cn

责任编辑　孙　菊

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

华亚伟, 张红娟, 刘康. 基于油松树轮重建陕西省镇安县 165 年以来 3—4 月平均最高气温. 应用生态学报, 2020, **31**(2): 381-387

Hua Y-W, Zhang H-J, Liu K. Reconstruction of the March-April average maximum air temperature over 165 years based on *Pinus tabuliformis* tree-rings of Zhen'an County, Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(2): 381-387