

利用树木年轮宽度资料重建长白山地区过去 240 年秋季气温的变化^{*}

王蔚蔚^{1,2} 张军辉^{1**} 戴冠华¹ 王秀秀¹ 韩士杰¹ 张寒松¹ 王 云³

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院研究生院, 北京 100049; ³长白山自然保护管理中心, 吉林安图 133613)

摘 要 分析了长白山地区水曲柳年轮宽度变化与气候要素的关系, 重建了该地区过去 240 年来的秋季平均气温。结果表明, 当年秋季平均气温与树轮宽度显著正相关 ($P < 0.01$); 重建方程为 $T_{\text{avg}} = 6.001 + 6.316X_{\text{RES}}$, 方差解释量为 38.6%, 调整后方差解释量为 35.8%。该地区近 240 年来秋季气温波动明显, 有 8 个较寒冷时期和 6 个较温暖时期, 其中, 1816、1817、1818 年的温度低于总体平均值的差值超过 1 °C, 6 个较温暖时期中, 1794、1795、1796、1797 年的温度高出平均温度的差值超过 1 °C, 其他时段的温度变化均在总体平均值上下 1 °C 范围以内。周期分析结果表明, 近 240 多年以来长白山地区秋季平均气温具有显著 ($P < 0.05$) 的 3~5 年及较显著 ($P < 0.1$) 的 8~16 年的周期。

关键词 秋季温度重建; 树轮; 水曲柳; 长白山

中图分类号 P467 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)4-0787-07

Variation of autumn temperature over the past 240 years in Changbai Mountains of Northeast China: A reconstruction with tree-ring records. WANG Wei-wei^{1,2}, ZHANG Jun-hui^{1**}, DAI Guan-hua¹, WANG Xiu-xiu¹, HAN Shi-jie¹, ZHANG Han-song¹, WANG Yun³ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;* ²*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* ³*Nature Reserve Management Center of Changbai Mountain, Antu 133613, Jilin, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 787–793.

Abstract: This paper analyzed the relationships of *Fraxinus mandshurica* tree-ring width chronology with climatic variables in Changbai Mountains, and reconstructed the chronology of autumn mean temperature in this area in 1765–2005. There was a significant positive correlation between the tree-ring width and the autumn mean temperature of current year ($P < 0.01$). The reconstructed function was $T_{\text{avg}} = 6.001 + 6.316X_{\text{RES}}$ ($R^2 = 0.386$, $R^2_{\text{adj}} = 0.358$, $P < 0.001$). Over past 240 years, the autumn temperature in Changbai Mountains fluctuated evidently, and the amplitude of the fluctuation was relatively stable. There were 8 colder periods and 6 warmer periods. During colder periods, the anomalies in 1816, 1817, and 1818 were greater than 1 °C, but in other years were less than 1 °C. Warmer periods were not obvious, and the time lengths were short. There were four warmer periods in 1794, 1795, 1796, and 1797, and the anomalies were greater than 1 °C. Wavelet spectral analysis indicated the existence of two significant cycles (8–16 and 3–5 years) of autumn mean temperature in the study area over past 240 years.

Key words: autumn temperature reconstruction; tree-ring; *Fraxinus mandshurica*; Changbai Mountains.

^{*} 中国科学院知识创新方向性项目 (KSCX-YW-Z-1022) 和国家自然科学基金项目 (40975071) 资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: jhzhang@iae.ac.cn

收稿日期: 2011-09-02 接受日期: 2011-12-17

树木年轮记录了树木生长对外界环境因子变化的响应(Fritts, 1976)。作为一种代用资料,树木年轮资料具有定年准确、连续性强、分辨率高等特点,被广泛应用于过去气候变化的重建,成为全球变化研究的重要手段之一(邵雪梅和吴祥定, 1997; Cook *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2011)。树木年轮宽度资料也已广泛应用于过去温度变化方面的重建(邵雪梅和吴祥定, 1997; Cook *et al.*, 2003; Frank & Esper, 2005)。目前的研究中,分季节的温度重建多集中在春季(邵雪梅和吴祥定, 1997; 刘洪滨和邵雪梅, 2003; Zhu *et al.*, 2009)、夏季(Wilson & Luckman, 2002; Büntgen *et al.*, 2005; 李宗善等, 2010)以及植物的生长季,如蔡秋芳等(2008)利用油松重建了陕西中-北部地区生长季4—9月的温度变化。关于秋-冬季的温度重建已有报道(史江峰等, 2009),但总体上,进行秋季温度重建的研究还较少,尤其是在东北地区,需加强该领域的研究。

春、秋季温度变化可能给森林生态系统的生产力带来深刻的影响。近20年来,北方春季和秋季气温分别升高了约1.1℃和0.8℃(Mitchell & Jones, 2005)。随之而来的是更长的生长季和更高的光合作用效率(Churkina *et al.*, 2005),有研究认为,这会延长未来碳获取和净碳吸收的时间(Churkina *et al.*, 2005; Piao *et al.*, 2008)。也有发现,秋季增温时,光合速率和呼吸速率都增加(Piao *et al.*, 2008),而呼吸速率增加更快。相反,春季增温导致的光合作用速率增加要高于呼吸作用速率。目前,北方陆地生态系统有可能由于秋季增温而引起CO₂损失,灵敏度约为0.2 Pg C · °C⁻¹,抵消了因春季增温而多吸收CO₂的90%,如果未来秋季增温发生速率快于春季,那么北方生态系统获取碳的能力有可能更快地降低(Cramer *et al.*, 2001)。这种变化在短期内难以直接检测,但由于森林中生物量的积累主要是靠树木的径向生长来支持,所以了解树木年轮宽度变化对秋季增温的响应规律,可为预测森林生态系统对增温的反应提供重要依据(王森等, 1995)。

北半球中高纬度区域是近半个世纪以来全球气候变化最显著的区域之一(Qian & Zhu, 2001),处于该区域的长白山地区受人类影响较小,自然生态系统保存完整,是研究树木生长与气候变化关系的理想地区。在本地区的树木年轮资料已被成功的用于气候因子的重建。邵雪梅和吴祥定(1997)用长白落叶松、朝鲜红松等进行了春季温度重建,发现长

白山区的树木径向生长对温度的响应较为显著,特别是春季温度;张寒松等(2007)利用长白山地区水曲柳年表进行了降水量的重建。本文利用长白山的水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)树木年轮资料,重建了240年以来的秋季温度变化,为长白山及东北地区近几百年来环境变化研究提供高分辨率的资料,同时也增加该地区树木年轮气候研究的密度,为预测未来气候变化下长白山森林生态系统生产力以及生长季长度的变化提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

本研究样地位于我国长白山北坡的中国科学院长白山森林生态系统开放研究站1号样地(42°24' N, 128°06' E, 海拔738 m)附近。1号样地为阔叶红松林,优势树种为红松、蒙古栎、水曲柳、紫椴、糠椴等。土壤类型为在火山灰母质上发育的暗棕壤。该地区气候属于受季风影响较大的温带大陆性气候,冬季寒冷而漫长,夏季温暖多雨而短暂。年均温约2.8℃,年降水量为600~900 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与测定 水曲柳样品取自于2005年10月在长白山北坡的阔叶红松林。按照国际树轮库(ITRDB)的标准,每棵树在胸高位置取2个芯,共取20棵树。取到的样芯放置在自制塑料U型管中,并在管上用油性笔标注代码,用纸封好。

样品预处理按照Stokes和Smiley(1968)的方法进行。首先将样品放置平坦处晾干,然后将其粘在特制的木槽中;将粘牢的样芯依次用由粗到细(280~600目)不同颗粒的砂纸进行打磨。

样品经预处理后,在体式显微镜下进行交叉定年(Cook *et al.*, 2002)。然后使用LINTAB年轮测量分析系统及对应的量测软件TASP进行测量,精度为0.001 mm。用COFECHA(Henri, 2001)程序对定年和量测结果进行了检验,保证定年与测量的准确性。对于那些定年效果较差、与主序列之间的相关系数达不到99%置信区的样芯予以剔除,最终得到14棵树的28根树芯用于年轮宽度年表的构建。

1.2.2 年表的建立 经过交叉定年的年轮序列,使用ARSTAN程序(Holmes, 1983)进行去趋势和标准化。这个过程能够消除树木生长中与年龄增长相关的生长趋势及部分树木之间的非一致性扰动,排除其中的非气候信号。首先用负指数的方法对每棵树

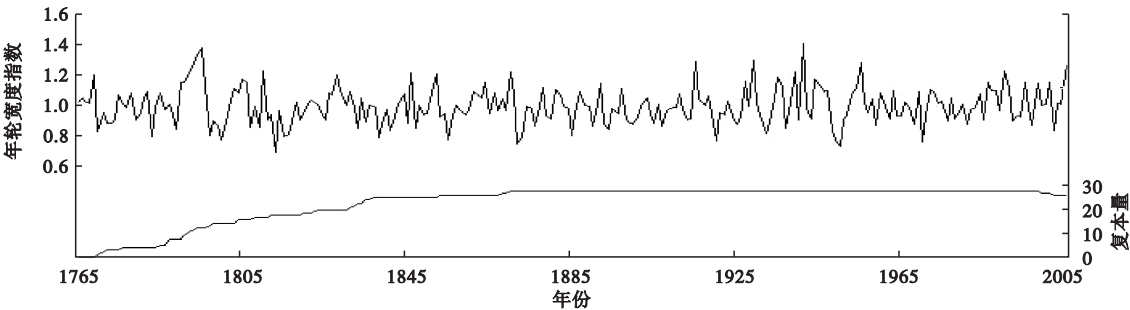


图 1 长白山地区水曲柳差值年表 (RES) 序列
Fig.1 *Fraxinus mandshurica* chronologies (RES) in Changbai Mountains

的年轮序列建立一条适宜的趋势线,以去除与树木年龄相关的生长趋势,这个过程能剔除大部分低频变化;如果不成功,则用任意斜率的线性回归进行直线拟合,并取树轮宽序列和与其对应的生长趋势拟合曲线的比值,对所得到的去趋势序列进行加权韧性平均,合成了平均值为 1、无量纲的树轮宽度年表(李宗善等,2010)(图 1)。ARSTAN 程序可以建立标准年表(STD),差值年表(RES),自回归年表(ARS)(Fritts, 1976),并对年表进行共同区间(1870—1998 年)分析(表 1)。

差值年表(RES)的各项统计特征要好于标准年表(STD)(表 1),差值年表离散度较低,逐年变化具有较高的共性。所以,本研究选用水曲柳差值年表(图 1)进行研究。

1.2.3 气象资料 气象资料(1982—2005 年)取自长白山天池气象站(海拔 2623.5 m)和中国科学院长白山森林生态系统定位站气象站(128°28'E、42°24'N、海拔 736 m)。所用的气候要素是月平均气温、月最高气温和月最低气温。对长白山森林生态系统定位站气象站的气温资料个别月份的缺值,参照与其相关性最高的天池气象站资料,用回归的方法进行了插补。此外,用 Kendall 方法(Kendall,

1970)检查了序列是否存在突变点,用 Double-mass 方法(Kohler, 1949)检查序列的非随机变化,检查结果表明,这 2 个站点的气象数据变化相对均一,无明显的突变点和随机变化,可以用来代表当地自然气候的变化。考虑到前 1 年气候状况对当年树木生长的影响,因此,所用气候资料为前 1 年 6 月到当年 12 月的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量。

1.3 数据分析

采用相关分析的方法,分析 1982—2005 年水曲柳年表和气温序列变化的关系,同时结合水曲柳年表和气温序列对比变化趋势,分析树木生长对气温的敏感性,检验秋季气温与年轮生长相关性的显著性,并对秋季平均气温进行重建。重建方程建立后,用留一法(李宗善等,2010)对方程可靠性进行检验,用符号检验、误差缩减值以及乘积平均值检验方程的稳定性。

采用 Morlet 小波基小波分析进行重建温度序列的周期性分析,使用红噪音过程进行显著性检验,使

表 1 水曲柳年表的统计特征及共同区间分析
Table 1 Statistic characters and common intervals analysis of *Fraxinus mandshurica* chronologies

	标准年表	差值年表
平均值	0.976	0.995
平均敏感度	0.105	0.129
标准差	0.202	0.124
一阶自相关系数	0.773	0.036
各序列与主序列相关	0.582	0.627
树间相关系数	0.338	0.347
信噪比	11.74	12.21
样本总体代表性	0.922	0.924
第 1 主成分解释方差量	38.03%	38.34%

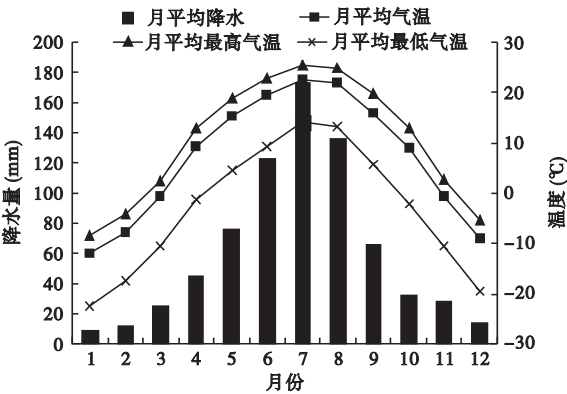


图 2 长白山地区月平均气温和降水变化(1982—2005 年)
Fig.2 Variations of mean monthly temperature (°C) and precipitation (mm) in Changbai Mountains area (1982–2005)

用 dplR 程序包 (Bunn, 2008) 进行小波分析与功率谱计算、检验。使用 SPSS 17.0 进行相关分析与模型构建。

2 结果与分析

2.1 水曲柳年表统计量特征

年表的统计量特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表所含不同频率信息量的多少。由表 1 可知, RES 年表的树间平均相关系数分别为 0.347, 各序列与主序列相关系数平均值为 0.627, 说明各单株间年轮的年径向生长较为一致, 是受相似环境因子影响的结果。平均敏感度比较低, 为 0.129, 说明树轮资料具有较弱的高频波动信号。序列的信噪比为 12.21, 样本量的总体代表性 (92.4%) 与第 1 主成解释方差量 (38.34%) 都比较高, 说明年表序列包含较多的环境信息, 该水曲柳年表适于进行年轮气候学的研究。

2.2 树木生长对气候要素的响应

树木生长与气候要素的相关关系是树轮气候学的基础。树木生长不仅受当年气象因子的影响, 而且受前一年气象因子影响。因此, 选取上年 9 月到当年 12 月共 16 个月的月平均气温, 月均最高气温及月均最低气温和月降水量序列与树木年表序列进行相关分析。

表 2 水曲柳差值年表与月份气温气候资料的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient for RES chronology and monthly meteorological data

月份	T	T_{\max}	T_{\min}	降水
9	-0.236	-0.259	0.005	0.380
10	0.021	0.000	0.069	-0.099
11	0.063	0.110	0.066	0.415 *
12	-0.039	0.071	-0.041	0.396
1	-0.310	-0.388	-0.071	-0.348
2	-0.314	-0.294	0.158	0.108
3	-0.156	-0.142	-0.096	-0.257
4	-0.037	-0.038	-0.081	0.159
5	-0.216	-0.222	0.177	0.150
6	0.149	-0.003	0.554	0.152
7	0.001	0.128	0.01	0.348
8	-0.132	-0.168	0.06	0.262
9	0.511 *	0.520 *	0.142	-0.101
10	0.545 *	0.602 *	0.291	-0.219
11	0.411 *	0.032	0.425 *	-0.437 *
12	-0.049	-0.056	0.044	0.108
9—10 月平均	0.622 **	0.659 **	0.298	

* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

由于水曲柳树木生长对当年秋季 (9—10 月) 的气温尤其平均气温较为敏感 (表 2), 所以选择重建秋季平均气温。从表 2 可知, 长白山地区低海拔 (738 m) 水曲柳树木径向生长主要与当年 9、10、11 月份月均温 (T), 9 月和 10 月月均最高气温 (T_{\max}) 以及 11 月月均最低气温 (T_{\min}) 呈显著正相关关系, 而与其他月份气温指标相关关系不显著。将 9、10 月气温进行平均作为秋季气温, 研究表明, 水曲柳树轮宽度与当年秋季 (9—10) 月均温 (T) 及最高气温 (T_{\max}) 呈极显著正相关。秋季气温的变化会引起生长季长度的变化, 从而影响树木光合作用和呼吸作用速率。气温升高使得光合作用和呼吸作用速率都增加, 但呼吸作用速率增加更快。秋季气温升高在延长树木生长时间, 增加光合作用产物的同时, 更多地消耗体内存留的营养物质, 从而不利于下一年树木的径向生长。而秋季气温下降虽然缩短了生长季节, 但可以抑制呼吸作用, 减少树木体内营养物质的消耗, 为下一年树木生长积累更多的营养物质。

2.3 秋季气温重建

将树轮年表定量地转换成过去的气候要素, 需要建立转换方程。利用水曲柳 RES 年表指数序列与秋季平均气温建立的线性转换方程 (1) (图 3) 如下:

$$T_{\text{avg}} = 6.001 + 6.316X_{\text{RES}}$$

$(R^2 = 0.386, R^2_{\text{adj}} = 0.358, P < 0.001)$ (1)

式中, T_{avg} 为秋季平均温度 (9—10 月), X_{RES} 为树轮年表的指数序列。在 1982—2005 年校准时段, 此方程非常显著。秋季温度的方差解释量为 38.6%, 调整后方差解释量为 35.8%。

转换方程建立之后采用年轮研究中常用的留一法 (leave-one-out) 对方程的可靠性进行检验 (李宗

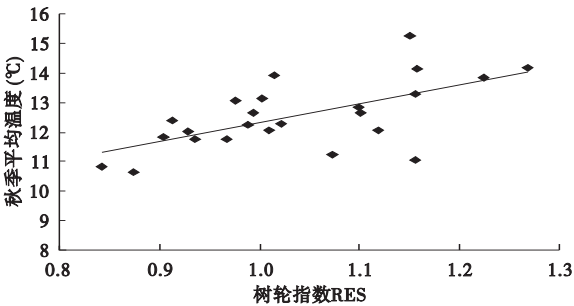


图 3 树轮指数与秋季 (9—10 月) 平均温度的散点图 (1982—2005 年)

Fig. 3 Scatter plot of autumn (September to November) temperature and tree-ring indices with quadratic relationship highlighted during the period of 1982–2005

善等,2010)。对于重建的校准期(1982—2005 年),重建方程的相关系数为 0.535,方差解释量是 0.286,调整后方差解释量为 0.254,均达到了 99% 的统计学显著水平。从重建秋季温度序列与器测数据在最近 24 年来的波动趋势看,重建序列较好地拟合了器测数据的波动规律(图 4)。对于重建方程的符号检验和乘积平均值检验也通过了显著性检验,缩减误差较高,为 0.147,一般认为,缩减误差为正值时,所监测的数据是可靠的;回归模型的估计和假设所作出的重建模型的各种检验参数均通过了统计检验,这些均说明该模型是较为稳定和可靠的,可用于该地区秋季温度(9—10 月)的历史重建。

2.4 重建秋季温度序列的波动特征

使用转换方程(1),重建了过去 240 年(1765—

2005 年)长白山地区秋季(9—10 月)平均气温序列(图 5)。从图 5 可以看出,该地区温度变化比较明显。重建温度序列显示在这 240 年间,有 8 个较寒冷时期,即温度低于平均值的时期,分别为 1800—1804 年、1812—1822 年、1836—1845 年、1876—1878 年、1909—1914 年、1921—1927 年、1950—1955 年和 1961—1987 年。其中 1816 年、1817 年、1818 年的温度与平均温度的差值超过 1℃,其他时段温度差异均在 1℃以内,变化平缓;6 个较温暖时期(温度高于平均值),分别为 1791—1799 年、1804—1810 年、1827—1834 年、1939—1949 年、1956—1960 年、1987—1994 年,1794 年、1795 年、1796 年、1797 年的温度与平均值的差值超过 1℃,其他时段高出平均温度的差异均在 1℃以内。其他时段温度波动在平均值附近,变化很小,较寒冷和较温暖时期交替分布,其中,据东北气候变化公报记载(中国气象局沈阳区域气象中心,2006),近百年秋季气温在 1909—1927 年和 1950—1987 年为偏冷时段;从 1988 年以后秋季气温逐渐变暖,重建温度趋势和该记载基本相符。

2.5 秋季气温重建序列周期

使用小波分析来识别秋季气温变化的周期性

表 3 长白山地区气候重建模型的留一法检验
Table 3 Leave-one-out cross-validation statistics of climate-growth model for climate reconstruction in Changbai Mountains areas, China

	r	R^2	R^2_{adj}	RE	ST	PMT
校准	0.622	0.386 *	0.358 *	—	—	—
验证	0.535	0.286 *	0.254 *	0.147	9-/13+ *	2.831 **

RE,缩减误差,ST,符号检验,PMT,乘积平均值检验,* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

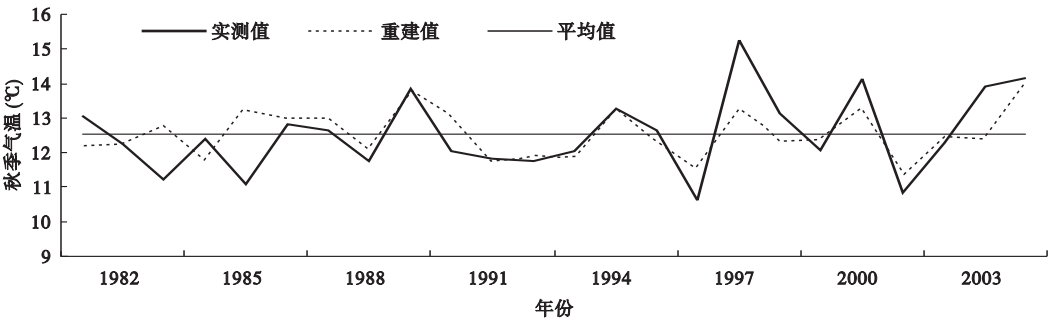


图 4 长白山秋季平均气温重建与实测序列(1982—2005 年)比较
Fig. 4 Comparison of actual and reconstructed autumn temperature from 1982 to 2005

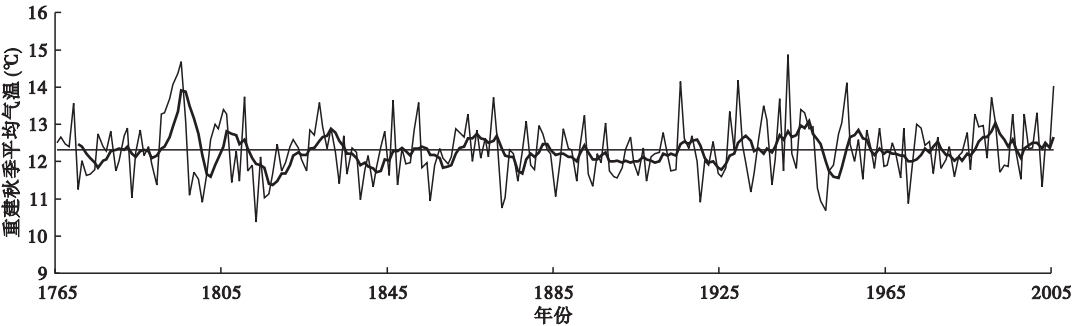


图 5 长白山秋季平均温度重建序列(1765—2005 年)
Fig. 5 Reconstruction of autumn temperature, plotted annually from 1765 to 2005
黑色粗线(—)是 6 年滑动平均。

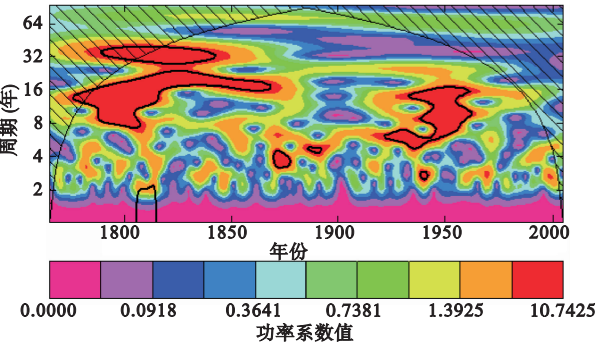


图 6 秋季气温重建序列小波功率谱
Fig. 6 Wavelet power spectrum for the reconstructed series
黑色阔线(阴影部分的边缘线)表示红噪音 5% 的显著水平。

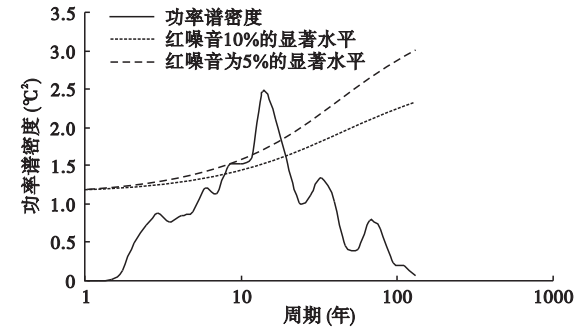


图 7 秋季气温重建序列的全局小波谱
Fig. 7 Global wavelet spectrum of the reconstructed series in Changbai Mountains

(图 6)。从图 6 可见,重建序列有明显的 3~5 年、8~16 年的周期。全局小波谱分析(图 7)进一步表明,长白山地区秋季气温变化存在明显的周期特征,其中以 13.899~16.529 最为显著,达到了 95% 的显著水平,8.264~16.529 的周期达到了 90% 的显著水平,没有其他更长的周期。

3~5 年周期处于公认的厄尔尼诺-南方涛动气候系统(El Niño/Southern Oscillation: ENSO)波动周期(2~8 年)范围内(Ropelewski & Halpert, 1987; McPhaden *et al.*, 2006)。而重建序列的 8~16 年周期很有可能是太阳黑子 11 年左右的活动周期的体现,太阳活动强弱的长周期变化被普遍认为对于大尺度气候系统有显著影响(Rind, 2002)。

上述的周期信号在时间尺度上是不稳定的,8~16 年的周期主要集中在 1785—1817 年、1940—1961 年。3~5 年的周期主要是在 1870—1880 年间。不难发现,周期信号较强的时段都是年际温度波动最明显的时段,也是较为寒冷的时期,这可能是由于 ENSO 事件和太阳活动较为强烈的缘故。

3 讨论

利用树木年轮进行气候要素如降水(勾晓华等, 2001; 邵雪梅等, 2004; 张寒松等, 2007; 张同文等, 2011)、气温(刘洪滨和邵雪梅, 2003; 李广起等, 2011)等的重建已有研究,研究的季节也多为春夏季节。本文分析了长白山地区水曲柳年轮宽度变化与气候要素的关系,重建了该地区过去 240 年来秋季平均气温,结果表明,近 240 年来秋季气温波动明显,有 8 个较寒冷时期和 6 个较温暖时期,并且具有显著($P<0.05$)的 3~5 年以及较显著($P<0.1$)的 8~16 年的周期。

全球性增温可能给森林生态系统的结构和生产力带来深刻的影响。在过去 20 年间,北方春季和秋季气温分别升高了约 1.1℃和 0.8℃。同时伴随有更长的生长季和更高的光合作用效率(Churkina *et al.*, 2005)。春季树木的展叶、开花主要受春季气温升高的影响,秋季的树木开花和黄落叶等主要是由于气温下降到一定的界限引起的(许雨晴等, 2006)。近几十年来,许多地区的气温都发生了显著的变化,这使植物开始和结束生长的日期发生了相应的变化,植物对全球变暖的响应表现为春季物候期提前,秋季物候期推迟,生长季相对延长(张福春, 1995; Menzel, 1999; Sparks *et al.*, 2000)。但是生长季的长度主要受早春气温的影响,并且由于全球变暖造成的春季物候事件已经有广泛的记录,然而秋季物候及生长季长度的研究还很少。有研究发现,生长结束时间的早晚对轮宽的形成影响较大(史江峰等, 2006),生长结束早,相应会形成窄轮;生长结束晚,相应会形成宽轮。因此,秋季温度的变化不仅会影响生长季长度的变化,还会影响轮宽的变化。本文研究了当年的秋季温度与轮宽的关系,研究表明轮宽与上一年气温相关不显著,这可能与选择的年表有关。树木生长除受温度影响外还受到其他气候因素,如降水等的影响,因此,应进一步对年轮宽度与其他气候因素的关系以及生长季长度的变化进行研究。

致谢 中国科学院沈阳应用生态研究所城市森林组陈振举研究员为年轮样品测定提供了便利条件和指导,年轮实验室的彭俊杰等给予了极大帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

蔡秋芳, 刘禹, 宋慧明, 等. 2008. 树轮记录的陕西中-北

- 部地区 1826 年以来的 4—9 月温度变化. 中国科学(D 辑), **38**(8): 971–977.
- 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 等. 2001. 利用树轮宽度重建近 280 a 来祁连山东部地区的春季降水. 冰川冻土, **23**(3): 292–296.
- 李广起, 白帆, 桑卫国. 2011. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应. 植物生态学报, **35**(5): 500–511.
- 李宗善, 刘国华, 张齐兵, 等. 2010. 利用树木年轮宽度资料重建川西卧龙地区过去 159 年夏季温度的变化. 植物生态学报, **34**(6): 628–641.
- 刘洪滨, 邵雪梅. 2003. 利用树木年轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化. 地理学报, **58**(6): 879–884.
- 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 2004. 树轮记录的青海德令哈地区前年降水变化. 中国科学(D 辑地球科学), **34**(2): 145–153.
- 邵雪梅, 吴祥定. 1997. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. 第四纪研究, (1): 76–83.
- 史江峰, 鹿化煜, 万建东, 等. 2009. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘近百年冬半年温度. 第四纪研究, (4): 831–836.
- 王森, 白淑菊, 陶大立, 等. 1995. 大气增温对长白山林木直径生长的影响. 应用生态学报, **6**(2): 128–132.
- 许雨晴, 陆佩玲, 于强. 2005. 近 50 年北京树木物候对气候变化的响应. 地理研究, **24**(3): 412–420.
- 张福春. 1995. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, **50**(5): 403–408.
- 张寒松, 韩士杰, 李玉文, 等. 2007. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区 240 年来降水量的变化. 生态学杂志, **26**(12): 1924–1929.
- 张同文, 王丽丽, 袁玉江, 等. 2011. 利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴伦台地区过去 645 年来的降水变化. 地理科学, **31**(2): 251–256.
- 中国气象局沈阳区域气象中心. 2006. 东北气候变化公报(第 1 期). http://www.lnmb.gov.cn/sy_news_content.asp?ID=2787.
- Bunn AG. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, **26**: 115–124.
- Büntgen U, Esper J, Frank DC, *et al.* 2005. A 1052-year tree-ring proxy for alpine summer temperatures. *Climate Dynamics*, **25**: 141–153.
- Büntgen U, Frank DC, Schmidhalter M, *et al.* 2006. Growth/climate response shift in a long sub-alpine spruce chronology. *Trees: Structure and Function*, **20**: 99–110.
- Chen ZJ, He XY, Cui MX, *et al.* 2011. The effect of anthropogenic activities on the reduction of urban tree sensitivity to climatic change: Dendrochronological evidence from Chinese pine in Shenyang city. *Trees: Structure and Function*, **25**: 393–405.
- Churkina G, Schimel D, Braswell BH, *et al.* 2005. Spatial analysis of growing season length control over net ecosystem exchange. *Global Change Biology*, **11**: 1777–1787.
- Cook ER, D'Arrigo RD, Mann ME. 2002. A well-verified, multi-proxy reconstruction of the winter North Atlantic Oscillation index since AD 1400. *Journal of Climate*, **15**: 1754–1764.
- Cook ER, Krusic PJ, Jones PD. 2003. Dendroclimatic signals in long tree-ring chronologies from the Himalayas of Nepal. *International Journal of Climatology*, **23**: 707–732.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward FI, *et al.* 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, **7**: 357–373.
- Frank D, Esper J. 2005. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps. *Dendrochronologia*, **22**: 107–121.
- Fritts HC. 1976. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press.
- Henri D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, **57**: 205–221.
- Holmes RL. 1983. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, **43**: 69–75.
- Kendall MG. 1970. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin.
- Kohler MA. 1949. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. *Bulletin of American Meteorological Society*, **82**: 96–97.
- McPhaden MJ, Zebiak SE, Glantz MH. 2006. ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, **314**: 1740–1745.
- Menzel A. 1999. Fabian PI Growing season extended in Europe. *Nature*, **397**: 659.
- Mitchell TD, Jones PD. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, **25**: 693–712.
- Qian WH, Zhu YF. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition. *Climatic Change*, **50**: 419–444.
- Rind D. 2002. The Sun's role in climate variations. *Science*, **296**: 673–677.
- Ropelewski CF, Halpert MS. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, **115**: 1606–1626.
- Piao SL, Ciais P, Friedlingstein P, *et al.* 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, **451**: 49–53.
- Sparks TH, Jeffree EP, Jeffree CE. 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *International Journal of Biometeorology*, **44**: 82–87.
- Stokes MA, Smiley TJ. 1968. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Wilson RJS, Luckman BH. 2002. Tree-ring reconstruction of maximum and minimum temperatures and the diurnal temperature range in British Columbia, Canada. *Dendrochronologia*, **20**: 257–268.
- Zhu HF, Fang XQ, Shao XM, *et al.* 2009. Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon. *Climate of the Past*, **5**: 661–666.

作者简介 王蔚蔚,女,1985 年 9 月生,硕士研究生,研究方向为森林生态学。E-mail: zpwangweiwei@126.com

责任编辑 王伟