

**【编者按】** 树木年轮以其定年准确、分辨率高、样本分布广泛等特点,成为全球变化研究的一个重要手段.目前,树木年轮学研究发展迅速,并形成树木年轮气候学、树木年轮生态学、树木年轮考古学和树木年轮化学等主要分支学科,同时延伸至水文学、灾害学、地貌学等诸多领域.中国的树木年代学研究起步虽晚,但发展迅速,表现为研究队伍不断壮大,区域气候及全球变化研究方面的成果突出,并成为当前国际树木年轮学界发展最为迅速的研究群体.

第三届中国树木年轮学术研讨会由沈阳农业大学和沈阳市科学技术协会主办,中国科学院沈阳应用生态研究所、中国科学院地球环境研究所、东北林业大学和辽宁省生态学会等协办,于2013年12月6—10日在辽宁省沈阳市召开.本届会议的主题是“森林与环境”.会议的宗旨是:一、发展我国树木年代学,同时立足于学科热点和前沿,认识树木年轮指示的森林与环境变化规律及其相互作用的关系与机制,推动学科发展;二、充分总结和交流近两年来国内树木年代学研究的成果与进展,扩大合作和学术交流,吸引和凝聚国内树木年代学人才队伍,促进学科交叉融合,解决树木年代学领域的重大科学问题,提升我国树木年代学的研究水平和影响力,促进重大科技成果产出;三、通过会议交流、推介各研究团队的成功经验,了解地区和国家层面树木年代学研究面临的实际问题 and 研究动态,提升树木年代学研究在保障国家生态安全和促进我国经济社会可持续发展中的贡献.

来自国内外36个教学科研单位的132名树木年代学学者和研究生参会.会议共进行了6个大会议主题报告和36个专题报告,收到学术论文摘要和全文56篇,内容涉及树木年轮与气候变化、树木对环境变化的生态响应、考古断代和稳定同位素技术等领域.为了及时总结此次会议成果,在更大范围内展示中国树木年代学学者的科研成果和创新活力,特精选论文6篇,在此集结出版,以为中国树木年代学的发展纪念,更为得到学界的关注与指正.

## 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应 ——以千山为例\*

李 腾<sup>1,2</sup> 何兴元<sup>1</sup> 陈振举<sup>1,3,4\*\*</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室,沈阳110164; <sup>2</sup>中国科学院大学,北京100049; <sup>3</sup>沈阳农业大学林学院,沈阳110866; <sup>4</sup>中国森林生态系统监测网络辽宁辽河平原森林生态系统定位研究站,辽宁昌图112500)

**摘 要** 蒙古栎是东北森林中最重要的阔叶树种之一.本研究利用树木年代学方法研究中国东北南部千山地区蒙古栎的径向变化,结合1951—2010年的温度和降水等气象数据,利用相关函数分析了树木生长与气候变化的关系,揭示蒙古栎径向生长对气候响应规律.结果表明:研究区4—7月的降水量与蒙古栎年轮宽度呈显著正相关,是限制该地区蒙古栎径向生长的主要限制因子;5月极端最高温度与蒙古栎年轮宽度呈显著负相关,也是影响蒙古栎生长的关键因素.研究期间,蒙古栎年轮宽度与4月降水量的相关显著且稳定,自20世纪80年代开始蒙古栎径向生长对夏季温度的响应敏感性逐渐减弱,对温度的响应表现出从响应夏季温度向响应春季温度的转变.

**关键词** 蒙古栎 年轮 气候变化 径向生长 气候响应

**文章编号** 1001-9332(2014)07-1841-08 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

\* 国家自然科学基金项目(31100327, 41271066, 41071035)、沈阳农业大学“天柱山学者”计划项目、中国森林生态系统监测网络CFERN&GENE奖励计划项目和辽宁省建筑生态物理技术与评价重点实验室开放基金项目(JZ-200909)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: chenchenjuf@iae.ac.cn

2014-01-07 收稿, 2014-04-28 接受.

**Tree-ring growth responses of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) to climate change in southern Northeast: A case study in Qianshan Mountains.** LI Teng<sup>1,2</sup>, HE Xing-yuan<sup>1</sup>, CHEN Zhen-ju<sup>1,3,4</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Forestry College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; <sup>4</sup>Research Station of Liaohe-River Plain Forest Ecosystem, Chinese Forest Ecosystem Research Network, Changtu 112500 Liaoning, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, **25**(7): 1841–1848.

**Abstract:** Mongolian oak is one of the most important broad-leaved tree species in forests, North-east China. Based on the methodology of dendrochronology, the variations of tree ring radial growth of Mongolian oak in Qianshan Mountains, south of Northeast China, were analyzed. Combined with the temperature and precipitation data from meteorological stations since 1951, the relationships between standardized tree ring width chronology and main climatic factors were analyzed. In this region, the precipitation between April and July of the current year had an significant relationship with the tree ring width of Mongolian oak, and was the main factor limiting the radial growth. The extreme maximum temperature of May was also a key factor influencing the tree ring width, which had a significant on the tree ring width of Mongolian oak. The precipitation in April had a significant and stable relationship with the growth of Mongolian oak since the 1950s. The ‘divergence problem’ was found in the study area, which the sensitivity of tree growth to summer temperature reduced since the 1980s. The tree growth response to temperature showed a seasonal change from summer to spring.

**Key words:** Mongolian oak; tree ring; climate change; radial growth; climate response.

近一个世纪以来,中国东北地区温度不断升高,降水量减少,地区气候呈现暖干化趋势,并且极端温度和极端降水的出现频率也发生了变化<sup>[1-2]</sup>。由于气候变化显著影响森林生态系统的结构和功能<sup>[3]</sup>,全球变暖背景下森林生态系统的响应研究越来越成为一个重要的科学问题。东北南部地区对气候变化响应较为敏感,因此该地区森林在暖干化气候下的响应机制研究显得尤为重要。树木作为森林生态系统的基本单元,研究主要树种的径向生长对气候变化的响应有利于探讨本地区森林生态系统的响应机制。

树木年轮以其定年准确、连续性强、分辨率高等优点,被广泛应用于气候变化和生态响应的研究<sup>[4-5]</sup>。目前,树木年代学研究的树种主要集中为祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等针叶树种<sup>[6-10]</sup>,对于阔叶树种的研究较少。作为东北森林中最重要的阔叶树种之一,蒙古栎(*Quercus mongolica*)可以在每年形成易分辨的清晰的年轮,适于树木年代学研究。有研究表明,中国东北东部林区蒙古栎林的发展趋势与东部林区的暖干化具有一致性,蒙古栎林会转变为顶极群落而不断扩大<sup>[11-12]</sup>。但东北南部地区关于蒙古栎对暖干化的响应研究甚少,亟待加强此方面的研究以增加人们对于森林生态系统对气候变化响应机制的了解。本文通过分析蒙古栎

径向生长与气候因子之间的相关关系,明确限制影响蒙古栎生长的主要气候因子,进而探讨蒙古栎径向生长对气候变化的响应。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省千山地区(41°11'23" N, 123°08'01" E),属于华北植物区系,地处华北、蒙古和长白植物分布的交错地带,平均海拔 286 m(图 1)。该地区属温带大陆性季风气候,年平均降水量 716.7 mm,年平均气温 8.7 °C,最冷月(1月)平均气温和降水量分别为-10.7 °C和 7.4 mm,最热月

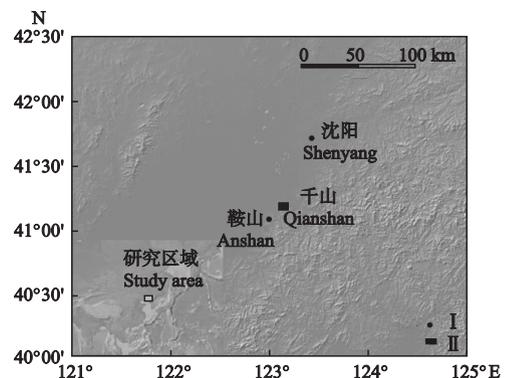


图 1 千山地区蒙古栎的采样点和气象站点  
Fig. 1 Locations of sampling site and meteorological stations in Qianshan Mountains.

I: 气象站点 Meteorological station; II: 采样点 Sampling site.

(7月)平均温度和降水量分别为24.8℃和180.8mm,全年相对湿度为76.4%,年无霜期165d.研究区土壤为森林棕砂壤,土层厚度>20cm.研究区内主要树种为油松和蒙古栎,还有紫椴(*Tilia amurensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)和大叶朴(*Celtis koraiensis*)等其他树种.

### 1.2 气象资料

气象资料来源于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>).选取沈阳(41°44'N, 123°31'E;海拔49.0m)和鞍山(41°05'N, 123°00'E;海拔77.3m)2个气象站点1951—2010年的月平均温度和月降水量.2个气象站点各月平均气温和降水量在公共区间(1951—2010年)具有显著的一致性(各月气温之间的相关系数为0.840~0.958,  $P<0.01$ ;各月降水量之间的相关系数为0.499~0.882,  $P<0.01$ ).为消除单个气象站点可能存在的随机误差,采用2个站点气象数据的平均值作为最终气象数据(图2).选取1981—2006年41°—42°N, 123°—124°E区域的UMD GIMMS NDVI数据,数据下载自荷兰皇家气象研究所的数据共享网站(<http://clim-exp.knmi.com>).根据归一化植被指数(NDVI)与气象数据的相关分析判定研究区树木生长季.

### 1.3 年轮数据

根据国际年轮数据库(international tree-ring data bank, ITRDB)的标准采集了28棵树的50个树芯(用生长锥在每棵树的胸径处按相反方向钻取1~2个树芯).样本树的胸径在16.8~41.2cm,树高在7.6~15.8m.将采集的样本晾干、粘贴,再用砂纸打磨至在显微镜下能看到清晰的年轮;然后按照树木年代学的技术方法将样本交叉定年<sup>[4,13]</sup>;再使用精度为0.001mm的LINTAB5年轮宽度测量仪

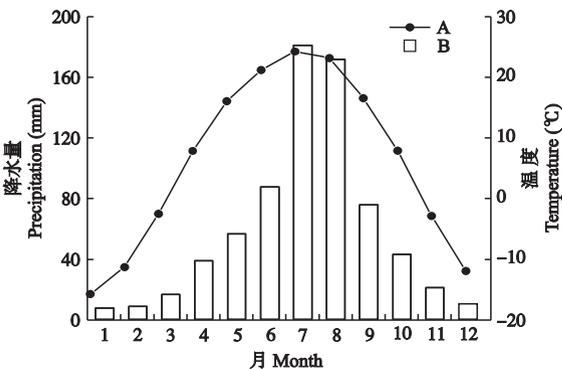


图2 千山地区的月平均温度(A)和降水量(B)

Fig. 2 Monthly mean temperature (A) and precipitation (B) of Qianshan area (1951–2010).

测量出样本每一轮的宽度;最后利用COFECHA软件<sup>[14]</sup>对测量结果进行检验修正.根据COFECHA软件的检验结果,序列间的相关系数为0.691,序列的平均敏感度为0.272,树芯平均树龄为58年.利用ASTAN程序<sup>[15]</sup>对交叉定年过的年轮序列进行去趋势和标准化处理.采用负指数函数或线性函数进行去趋势以减少低频信号的损失,对于无法用负指数函数或线性函数进行去趋势的年轮序列采用综合负指数函数和多项式的Hugershoff方程<sup>[16]</sup>进行去趋势.在去趋势和标准化处理后,利用自回归模型去除树木受前一年生长的影响.最终建立该地区蒙古栎标准化年表(STD,图3)、残差年表(RES)和自回归年表(ARS).

STD年表保留有更多的低频信号<sup>[17]</sup>,本文讨论以其为主.选用的公共区间为1950—2010年.采用样本间的平均相关性(rBar)和样本总体代表性(expressed population signal, EPS)来评估年表序列的可靠性<sup>[18]</sup>.EPS的阈值为0.85,还有一些其他的标准化年表的统计指标,如标准差(standard deviation, SD)、平均敏感度(mean sensitivity, MS)和一阶自相关(first-order autocorrelation, PC1)等(表1).SD表示年轮宽度测量数据的变率,SD越大表示年轮序列越响应环境变量.MS是树木年轮宽度的逐年变化状况,用来衡量相邻年轮宽度的变化,其值越大,表示

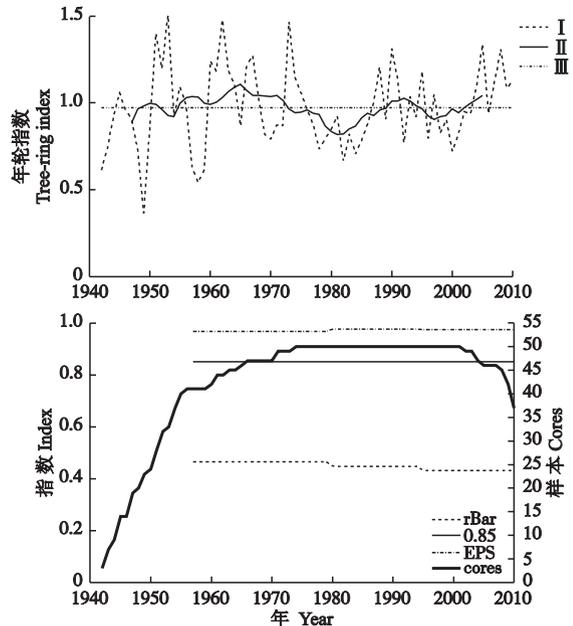


图3 STD年表及其样本间的平均相关性(rBar)、样本总体代表性(EPS)和样本量(cores)

Fig. 3 STD chronology and mean relativity (rBar), expressed population signal (EPS), and sample size (cores).

I: 标准化年表 STD; II: 11年滑动平均值 11-year moving mean; III: 平均值 Mean.

表 1 千山蒙古栎 3 种年表统计指标

Table 1 Statistics of the three chronologies of Mongolian oak in Qianshan Mountains

统计指标 Statistics index	标准化年表 STD	差值年表 RES	自回归年表 ARS
标准差 Standard deviation	0.233	0.211	0.230
平均敏感度 Mean sensitivity	0.216	0.247	0.214
一阶自相关系数 First order autocorrelation coefficient	0.400	0.002	0.389
信噪比 Signal to noise ratio	12.543	-	-
样本总体代表性 Expressed population signal	0.926	-	-
平均相关性 Mean correlation	所有树芯间 All series rbar	0.439	-
	同树间 Within-tree rbar	0.748	-
	不同树间 Between-tree rbar	0.429	-

样本保持的气候信号越多。

#### 1.4 数据处理

利用 Mann-Kendall 检验<sup>[19]</sup>方法分析千山地区气温和降水的变化特征,确定气候突变年份。Mann-Kendall 检验是一种非参数检验方法,且不需要样本遵从特定的分布,同时也不受少数异常值的干扰,可以客观地表征时间序列的变异趋势,其基本原理是通过定义并分析  $U_f$  和  $U_b$  两个统计量来分析研究区气候的变化趋势,当  $U_f$  统计量值  $>0$  时表明气候因子呈上升趋势, $<0$  则表明呈下降趋势, $U_f$  和  $U_b$  两个统计量在置信区间的交接点即为气候因子的突变点<sup>[19]</sup>。依据伊万诺夫湿润度<sup>[20]</sup>来分析研究区的干湿变化状况。伊万诺夫湿润度( $K$ )可以表示区域的干湿状况和植物的地理分布,其分级标准: $K < 0.13$  代表极干旱, $0.13 < K < 0.3$  代表干旱, $0.3 < K < 0.6$  代表半干旱, $0.6 < K < 1.0$  代表半湿润, $K > 1.0$  代表湿润。采用响应函数来揭示蒙古栎径向生长与气候因子之间的相关关系。利用 Dendroclim2002 程序<sup>[21]</sup>分析年轮宽度与气候因子之间相关系数的动态变化,来研究蒙古栎树木生长对气候变化的响应。利用 Dendroclim2002 程序中的 moving and evolutionary response and correlation 分析 1951—2010 年上年 9 月至当年 9 月各月平均温度和降水量与蒙古栎年轮宽度的相关系数在时间上的稳定性;选取的滑动区间为 31 年,即从 1952—1982 年开始逐年向后滑动,每 31 年计算一个相关系数。通过与年轮宽度显著相关的气候因子和 STD 年表之间的多元回归模型模拟蒙古栎径向生长变化,并根据此模型预测未来该地区温度增加  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  情景下的蒙古栎径向生长变化。基于 Lieth<sup>[22]</sup>的 Thornthwaite Memorial 模型研究区域森林气候生产力并探讨其与蒙古栎年轮宽度变化的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区气候变化趋势

自有器测气象数据(1951 年)以来,本研究区呈现明显的暖干化趋势:气温变暖趋势为  $0.36\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ,年降水量降低趋势为  $9.8\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。其中,2 月的气温变暖趋势最明显,升高趋势为  $0.78\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ ,9 月的年降水量降低最明显,降低趋势为  $7.7\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。本文通过 Mann-Kendall 检验方法分析了该研究区 1951—2010 年的气温和年降水量变化特征(图 4)。结果表明:研究区年平均温度呈现持续上升趋势( $U_f$  曲线),并且在 1994 年开始超过了  $\alpha=0.05$  置信水平的临界值,上升趋势明显,根据  $U_f$ 、 $U_b$  曲线交叉点判断这种上升趋势是种突变,突变年份为 1981 年;研究区年降水量( $U_f$  曲

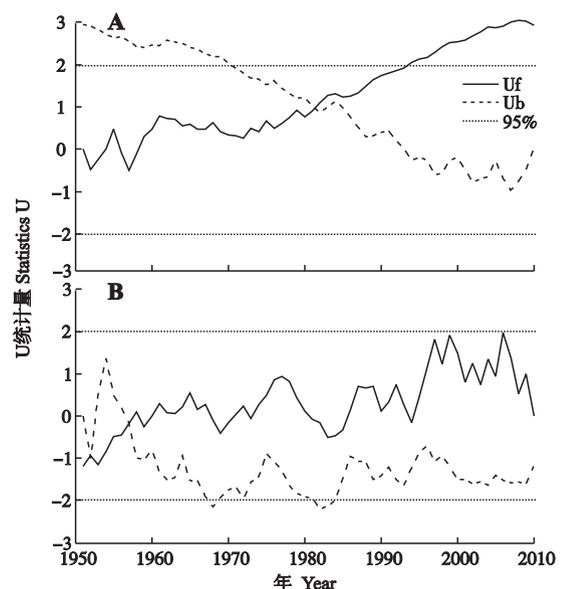


图 4 千山年平均温度(A)和年降水量(B)的 Mann-Kendall 曲线

Fig. 4 Mann-Kendall curves of annual temperature (A) and precipitation (B) of Qianshan Mountains.

线)呈下降趋势,其在20世纪50、60年代下降较为明显.研究期间,本研究区的干湿状况有变干趋势(图5).Mann-Kendall检验指示研究区K值的突变年份为1959年,突变点前后的K值变化明显:1951—1958年,2个气象站点的平均K值为1.03;1959—2010年2个站点的平均K值下降到0.71.研究区的气候表现出由湿润转化为半湿润的状况.

## 2.2 蒙古栎年轮宽度与主要气候因子的关系

蒙古栎年轮宽度变化与当年2、4、5和7月降水量呈显著正相关,与前一年12月降水量呈显著负相关( $P < 0.05$ ),除5月以外,年轮宽度与温度相关性不显著(图6).蒙古栎年轮宽度与当年4—7月降水量呈显著正相关( $P < 0.01$ ),与4—7月的平均温度没有达到显著相关,说明4—7月的降水量是限制该地区蒙古栎径向生长的主要限制因子.

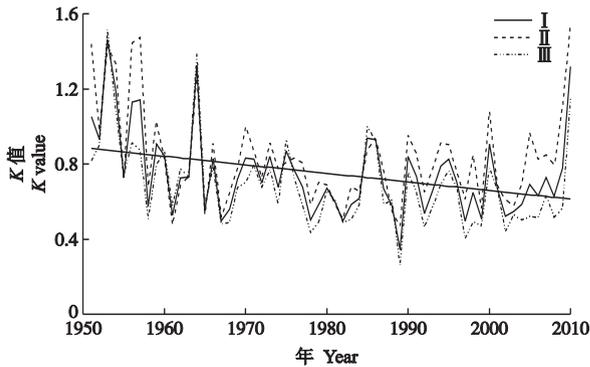


图5 沈阳、鞍山两个气象站点的K值变化及其和两个气象站点平均值

Fig. 5 K value and mean of meteorological stations in Shenyang and Anshan.

I: 平均K值 Mean K value; II: 沈阳 Shenyang; III: 鞍山 Anshan. 直线代表线平均K值的线性拟合趋势线 The straight line represented the linear fitting line of the average K value.

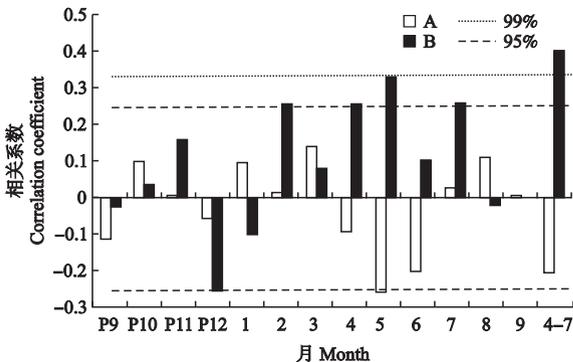


图6 STD年表与温度(A)和降水量(B)的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients of STD chronology with temperature (A) and precipitation (B).

P: 前一年 Previous year.

## 2.3 蒙古栎年轮宽度对暖干化的响应

1951年以来,研究区气候呈现明显的暖干化.通过Dendroclim2002程序分析蒙古栎年轮宽度对暖干化的响应稳定性,结果显示,上年9月温度从1969—1989年开始与年轮宽度相关性增强,并在1962—1992年至1973—2003年期间与年轮宽度呈呈现出稳定的显著负相关关系;5月平均温度在1968—1998年之后与年轮宽度呈显著负相关;蒙古栎年轮宽度从1960—1990年开始对夏季温度的响应敏感性呈现出下降趋势;冬季温度与年轮宽度不存在显著相关关系(图7A).蒙古栎年轮宽度与降水量的相关性随时间的动态变化主要表现为(图7B):上年12月降水量在1952—1982年至1960—1990年期间与年轮宽度呈显著负相关,之后相关性不断降低;2月降水量自1970—2000年以后与年轮宽度呈显著正相关;4月降水量整体上与年轮宽度的相关性较高,在1958—1988年至1969—1999年期间与年轮宽度出现显著正相关;7月降水量在1958—1988年前也显著影响蒙古栎径向生长.

与年轮宽度显著相关( $P < 0.05$ )的气象因子(2、4和7月降水量及5月的平均温度)可以总体上解释蒙古栎实际径向生长的25.1%,在调整自由度损失后还可以解释实际径向生长19.6%的变异( $r = 0.50, F = 4.6, P < 0.01$ ),虽然解释量不高,但随时间和气候变化发生变化,如1981年以后可解释蒙古栎径向生长27.7%的变异,尤其1989年(显著增温开始后)以后,模型可解释45.0% ( $P < 0.01$ )蒙古栎径向生长变化(图8).由于生长季关键月份(如5月)的温度呈负相关(图6),若未来该地区温度增加 $1^{\circ}\text{C}$ ,蒙古栎径向生长将会减少4.6%.

## 3 讨 论

### 3.1 蒙古栎径向生长对气候因子的响应

归一化植被指数(NDVI)可以指示该地区总体的物候变化.NDVI、气象数据和相关分析结果显示,该地区树木生长的关键时期主要为5—9月,树木在9月中下旬进入休眠期停止生长.研究区内降水变化显著影响蒙古栎径向生长( $P < 0.05$ ),尤其5月降水对树木径向生长的影响最明显:4、5月是树木的春季萌芽期,期间充足的降水可满足树木根系生理活动对大量水分的需求从而促进树木生长.7月是树木生长最活跃的月份,树木的各项生理活动最旺盛,此时充沛的降水会提高土壤含水量,加速树木的各项生理活动从而促进树木径向生长.虽然8月降

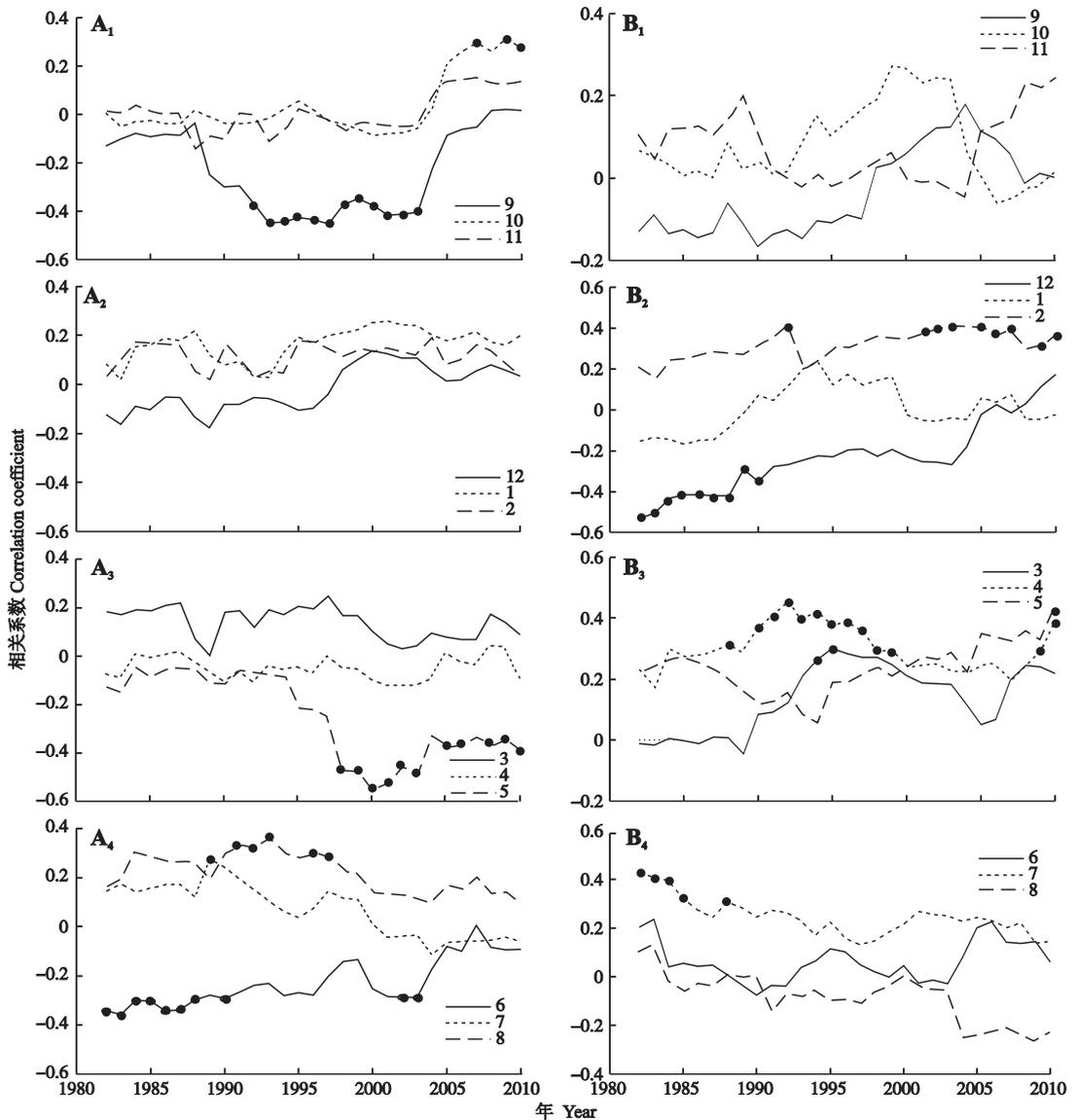


图7 蒙古栎 STD 年表对各月温度(A)和降水量(B)响应的稳定性

Fig. 7 Climate response stabilities of STD chronology to monthly temperature (A) and precipitation (B).

实心圆点表示相关性达到显著水平( $P < 0.05$ ) Filled circles indicated significant relationships at 0.05 level;  $A_1$ 、 $B_1$  分别表示上年9—11月的温度和降水  $A_1$  and  $B_1$  presented the temperature and precipitation from September to November of last year, respectively;  $A_2$ 、 $B_2$  分别表示上年12月到当年2月的温度和降水  $A_2$  and  $B_2$  presented the temperature and precipitation from December of last year to February of current year, respectively;  $A_3$ 、 $B_3$  分别表示当年3月到5月的温度和降水  $A_3$  and  $B_3$  presented the temperature and precipitation from March to May of current year, respectively;  $A_4$ 、 $B_4$  表示当年6—8月的温度和降水  $A_4$  and  $B_4$  presented the temperature and precipitation from June to August of current year, respectively.

水也较多,但土壤含水量经过前期降水后趋于饱和,较多的降水或许会对树木根系产生胁迫而不利于树木生长。另外,本研究还发现,上年12月降水会显著限制树木生长( $P < 0.05$ ),上年12月和当年1月是研究区一年中最冷的时期,一般降雪增多会使第二年春季融雪时间增长,推迟根系开始生长时间,缩短生长季导致树木形成窄轮<sup>[6]</sup>,而降雪减少容易导致土壤温度降低,冻土深度增加,容易引发根系受冻死亡<sup>[10]</sup>,从而影响树木生长。本研究表明,中国东北南部千山地区4—7月降水对蒙古栎径向生长的影响

最明显( $P < 0.01$ ),说明4—7月降水量是影响该地区树木径向生长的主要限制因子。

5月平均温度与蒙古栎年轮宽度存在显著负相关关系( $P < 0.05$ ),除5月平均温度外,研究区各月平均温度变化与蒙古栎年轮宽度没有显著相关性。此外,5月极端最高温度与蒙古栎年轮宽度变化呈现显著负相关( $r = -0.303, P < 0.05$ )。5月正处于蒙古栎生长季早期,树木生长需要较多水分,此时较高的温度会提高土壤水分蒸发量使土壤水分不足,降低蒙古栎叶片的净光合速率,影响蒙古栎的光合性

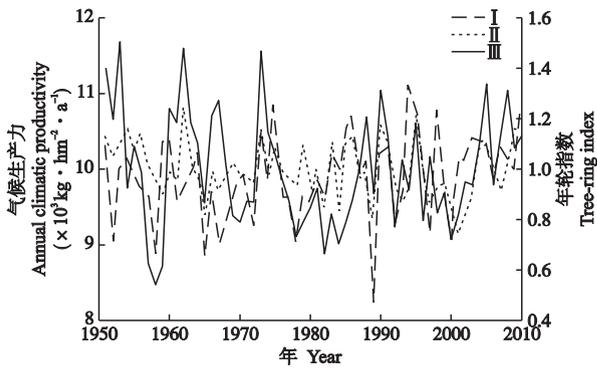


图8 模拟年轮宽度、实际年轮宽度及气候生产力的比较

Fig. 8 Comparison of simulated tree ring width, actual tree ring width, and annual climatic productivity.

I: 气候生产力 Climatic productivity; II: 模拟年轮指数 Simulated tree ring width; III: 实际年轮指数 Actual tree ring width.

能,导致树木内部养分积累减少,致使树木形成窄轮<sup>[23-25]</sup>.因此,5月的温度,尤其是5月极端最高温度,也是影响蒙古栎生长的关键因素.

### 3.2 区域暖干化对蒙古栎生长的影响

气温明显变暖(1981年)后,研究区蒙古栎径向生长对2、4、5月降水的响应更加敏感,对7、12月降水的响应敏感性降低.上年12月降水与树木年轮宽度之间的相关性在1990年前后明显不同,这可能是因为在气温没有明显变暖之前,上年12月降雪增多会使第二年春季融雪时间增长,缩短生长季导致树木形成窄轮从而使树木生长受到限制,但随着研究区气温逐渐变暖,这种限制作用得到不断缓解.随着区域暖干化,蒙古栎径向生长对2月降水的响应敏感性不断提高.2月是所有月份中变暖趋势最明显的月份,其年均温由2000年之前的 $-6.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增温到2000年后的 $-4.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,增温约 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .2月较多的降雪有利于土壤保温,并且会在积雪融化后为树木提供及时的水分而有利于当年树木生长.由此可见,树木生长季前以及生长季充足的降水会提高土壤水分,树木可以在其开始萌发及快速生长时得到较多水分补给,为树木细胞分裂等生理活动提供充足的水分供应,使树木易形成较宽的年轮.

近年来的气温变暖不利于该地区树木的径向生长.该地区1989年明显增温后各月温度对树木径向生长的影响出现较大波动,尤其上年9月和当年5月温度对蒙古栎径向生长出现明显的负效应(图7A).9月虽然树木生长变得缓慢,但树木的形成层仍进行生理活动,在气温变暖背景下上年9月温度仍会限制来年树木径向生长变化.此外,5月平均温度从1994年后明显影响蒙古栎径向生长,气温变暖

后,5月较高的温度会降低土壤水分,影响树木光合作用,限制蒙古栎生长.研究区蒙古栎年轮宽度自20世纪80年代开始对夏季温度响应明显减弱(图7A).这种自20世纪中期以来出现的树木年轮宽度对夏季温度响应敏感性降低的现象被称为“失敏效应”(divergence problem, DP)<sup>[26]</sup>.该研究区近50年来气候不断变暖变干,其中温度在1981年发生增温突变,气温明显变暖后由于温度升高引起的干旱胁迫<sup>[26-27]</sup>可能是导致研究区蒙古栎温度响应敏感性下降的主要原因.综上,气温明显变暖(1981年)后,研究区蒙古栎径向生长对5月温度的响应更加敏感,对夏季温度的响应敏感性降低,蒙古栎径向生长对温度的响应表现出从响应夏季温度向响应春季温度的转变,预示出研究区树木响应气候的敏感性并非稳定不变的,其与环境变化也存在一定的关联性,树木对气候的响应敏感性会因周围环境的改变而发生相应变化.

### 3.3 未来蒙古栎径向生长的预测

基于Lieth<sup>[22]</sup>提出的Thornthwaite Memorial模型得出的研究区森林气候生产力与蒙古栎年轮宽度的高频变化呈显著正相关( $P < 0.05$ )(图8),表明蒙古栎作为研究区的代表树种之一,其生长变化可以解释部分区域森林气候生产力变化.研究区森林气候生产力介于 $8823.2 \sim 11123.1\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,并以 $8.67\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率增加,这与研究区蒙古栎年轮指数的变化趋势并不一致,这是因为气候生产力指气候条件决定的单位面积森林整体的生物量或生产力,说明经验模型的局限性或单一树种的某些随机性,使所得的研究区森林气候生产力变化与蒙古栎径向生长变化不完全吻合.另外,对于模型的局限性可参照树木年轮参数进行矫正.

本地区与辽宁西部医巫闾山<sup>[28]</sup>的蒙古栎生长具有一致的生长变化趋势( $P < 0.05$ ),但本地区蒙古栎年轮宽度明显大于医巫闾山蒙古栎年轮宽度(20.9%).蒙古栎这种在空间上的相同生长趋势,表明在东北地区暖干化气候背景下,该树种总体响应一致,但其径向生长变化会因所属地区的气候和生物环境不同而有所差异.

在气候变暖的全球背景下,该地区有从湿润转化为半湿润的趋势.若该地区温度不断增加、降水不断减少,作为优势阔叶树种的蒙古栎径向生长将会受到限制.这与研究区中的优势针叶树种——油松的生长变化趋势相吻合,在暖干化趋势下油松径向生长及其净初级生产力均呈下降趋势<sup>[29]</sup>.为了消除

单一树种的局限性,精确、全面地评估气候变化对森林生态系统的影响,多树种综合的生态响应研究是大势所趋。

#### 参考文献

- [1] Ding Y-H (丁一汇), Ren G-Y (任国玉), Zhao Z-C (赵宗慈), *et al.* Detection, attribution and projection of climate change over China. *Desert and Oasis Meteorology* (沙漠与绿洲气象), 2007, **1**(1): 1-10 (in Chinese)
- [2] Zhao C-Y (赵春雨), Ren G-Y (任国玉), Zhang Y-F (张运福), *et al.* Climate change of the Northeast China over the past 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2009, **23**(7): 25-30 (in Chinese)
- [3] Van Mantgem PJ, Stephenson NL, Byrne JC, *et al.* Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science*, 2009, **323**: 521-524
- [4] Fritts HC. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976
- [5] Wu X-D (吴祥定). *Tree-rings and Climate Change*. Beijing: China Meteorological Press, 1990 (in Chinese)
- [6] Shao X-M (邵雪梅), Huang L (黄磊), Liu H-B (刘洪滨), *et al.* Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delinha, Qinghai. *Science in China Series D* (中国科学·D辑), 2004, **34**(2): 145-153 (in Chinese)
- [7] Liang E, Liu X, Yuan Y, *et al.* The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China. *Climatic Change*, 2006, **79**: 403-432
- [8] Liu Y, An Z, Ma H, *et al.* Precipitation variation in the northeastern Tibetan Plateau recorded by the tree rings since 850 AD and its relevance to the Northern Hemisphere temperature. *Science in China Series D*, 2006, **49**: 408-420
- [9] Chen Z, Zhang X, Cui M, *et al.* Tree-ring based precipitation reconstruction for the forest-steppe ecotone in northern Inner Mongolia, China and its linkages to the Pacific Ocean variability. *Global and Planetary Change*, 2012, **86**: 45-56
- [10] Yuan Y-J (袁玉江), Li J-F (李江风). Reconstruction and analysis of 450 years' winter temperature series in Urumqi River source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 1999, **21**(1): 64-70 (in Chinese)
- [11] Chen D-K (陈大珂), Zhou X-F (周晓锋), Lin Y (林业). *Natural Secondary Forest: Structure, Function, Dynamics, and Management*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994 (in Chinese)
- [12] Zhou X-F (周晓峰), Zhang Y-D (张远东), Sun H-Z (孙慧珍), *et al.* The effect on climate change on population dynamics of *Quercus mongolica* in North Great Xing'an Mountain. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2002, **22**(7): 980-985 (in Chinese)
- [13] Stokes MA, Smiley TL. *An Introduction to Tree-ring Dating*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1996
- [14] Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 1983, **43**: 69-78
- [15] Cook ER, Holmes RL. Users Manual for Program AR-STAN. Tucson, AZ: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986
- [16] Warren W. On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-ring Bulletin*, 1980, **40**: 35-44
- [17] Cook ER, Kairiukstis LA. *Methods of Endrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1990
- [18] Wigley T, Briffa K, Jones P. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23**: 201-213
- [19] Wei F-Y (魏凤英). *Modern Technology of Statistics, Diagnosis and Forecast for Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1999 (in Chinese)
- [20] Deng S-Z (邓世宗), Wei B-E (韦炳斌). *Analysis and Exploitation of Forest Climatic Resources in Guangxi Province*. Beijing: China Meteorological Press, 1993 (in Chinese)
- [21] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, **30**: 303-311
- [22] Lieth H. *Modeling the Primary Productivity of the World*. New York: Springer, 1975
- [23] Oberhuber W, Stumbock M, Kofler W. Climate tree-growth relationships of scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees: Structure and Function*, 1998, **13**: 19-27
- [24] Zeng W (曾伟), Jiang Y-L (蒋延玲), Li F (李峰), *et al.* Responses of *Quercus mongolica*'s photosynthetic parameters to soil moisture stress. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(6): 2504-2510 (in Chinese)
- [25] Gindl W, Grabner M, Wimmer R. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees*, 2000, **14**: 409-414
- [26] Jacoby GC, D'Arrigo RD. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**: 227-234
- [27] Barber VA, Juday GP, Finney BP. Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature*, 2000, **405**: 668-673
- [28] Peng J-J (彭俊杰). *Modeling the Responses of Forest Vegetation to Climate Change: A Case Study in Western Liaoning, China*. Master Thesis. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012 (in Chinese)
- [29] Peng J-J (彭俊杰), He X-Y (何兴元), Chen Z-J (陈振举), *et al.* Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO<sub>2</sub>: A simulation based on BIOME-BGC model and tree-ring data. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(7): 1733-1742 (in Chinese)

作者简介 李腾,男,1989年生,硕士研究生.主要从事树木年代学、树木年轮生态学研究. E-mail: liteng89@126.com

责任编辑 杨弘