

DOI: 10.5846/stxb201501260209

王婷, 李聪, 张弘, 任思远, 李鹿鑫, 潘娜, 袁志良, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应. 生态学报, 2016, 36(17): - .  
Wang T, Li C, Zhang H, Ren S Y, Li L X, Pan N, Yuan Z L, Ye Y Z. Response of conifer trees radial growth to climate change in Baotianman National Nature Reserve, central China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

## 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应

王 婷<sup>1</sup>, 李 聪<sup>2</sup>, 张 弘<sup>3,4</sup>, 任思远<sup>1</sup>, 李鹿鑫<sup>1</sup>, 潘 娜<sup>1</sup>, 袁志良<sup>1</sup>, 叶永忠<sup>1,\*</sup>

1 河南农业大学, 郑州 450002

2 河南省新郑市气象局, 新郑 451100

3 河南省气象科学研究所, 郑州 450003

4 中国气象局·河南气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

**摘要:** 树木年轮资料能够提供区域内过去长时间的环境和气候信息, 成为获取过去气候变化信息的重要手段之一。利用采自宝天曼自然保护区的两种针叶树种油松和华山松树木年轮样本分别建立了油松和华山松树轮宽度标准年表 PT 和 PA, 并将油松和华山松样本合并建立了联合树种的区域年表(RC)。三种年表分别与不同气候要素(月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量)及其不同月份组合进行相关分析, 结果表明, 油松年表 PT 和华山松年表 PA 都包含较高的气候信息, 且都和生长季不同月份温度显著负相关和降水显著正相关。其中, 油松和华山松都与当年 4 月和 5 月降水显著正相关, 油松还与当年 5 月的平均最高温度和上年 11 月最低温显著负相关, 与当年 3 月平均最低气温显著正相关; 华山松与上年 10 月和当年 4 月的平均最高温度显著负相关, 与上年 12 月和当年 7 月平均最低温度显著正相关; 联合年表 RC 包含了单个年表 PT 和 PA 共同的气候信息, 与当年 4—5 月降水和 3 月最低温显著正相关, 与当年 7 月最低温和 4、5 月最高温显著负相关。不同年表与生长季(3—8 月)内气候要素月份组合的相关分析也表明联合年表 RC 包含和单物种年表 PT、PA 相似的气候信息并加强了 PT、PA 受当年生长季气候变化影响的公共信号。可见, 同一地区的多树种联合年表一定程度上能体现出区域性树木生长对气候变化响应的生态生理特征, 为同地区建成多树种联合年表来探讨当地区域性气候变化提供了可行性的理论基础和一定的参考作用。

**关键词:** 树木年轮; 气候变化; 油松; 华山松; 多物种联合年表; 暖温带-北亚热带过渡带

## Response of conifer trees radial growth to climate change in Baotianman National Nature Reserve, central China

WANG Ting<sup>1</sup>, LI Cong<sup>2</sup>, ZHANG Hong<sup>3,4</sup>, REN Siyuan<sup>1</sup>, LI Luxin<sup>1</sup>, PAN Na<sup>1</sup>, YUAN Zhiliang<sup>1</sup>, YE Yongzhong<sup>1,\*</sup>

1 Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Xinzheng Meteorological Bureau, Xinzheng 451100, China

3 Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China

4 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China

**Abstract:** Tree-ring width data are an important proxy for assessing climatic changes because they provide continuous yearly paleoclimatic records for regions or time periods for which instrumental climate data are not available. Two standard tree-ring width chronologies of *Pinus tabulaeformis* (PT) and *Pinus armandii* (PA) were developed from Baotianman National Nature Reserve, and another regional multispecies chronology (RC) was also established with all samples from *P. armandii* and *P. tabulaeformis*. Monthly mean temperature ( $T$ ), mean monthly maximum temperature ( $T_{max}$ ), mean monthly

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270493); 植被与环境变化国家重点实验室 2012 年开放课题(LVEC-2012k06)

收稿日期: 2015-01-26; 网络出版日期: 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yeyzh@163.com

minimum temperature ( $T_{min}$ ), total monthly precipitation ( $P$ ), and seasonal climate variables were employed to discuss the correlations between chronologies (PT, PA, and RC) and climate factors. The results showed that single species chronologies (PT and PA) had strong climatic signals and similar responses to the same climatic factor. Monthly precipitation in April and May had a significant positive influence on *P. armandii* and *P. tabulaeformis*, whereas monthly temperature had different effects on tree growth. PT was negatively correlated with  $T_{max}$  in May and  $T_{min}$  in the previous November and was positively correlated with  $T_{min}$  in March. PA showed a negative correlation with  $T_{max}$  in the previous October and current April and a positive correlation with  $T_{min}$  in the previous December and current July. The RC, which assessed both species together, showed collective climatic responses of single-species chronologies PT and PA. RC showed a significant positive correlation with  $P$  in April and May and with  $T_{min}$  in March. However, it showed a negative correlation with  $T_{min}$  in July and  $T_{max}$  in April and May. On the other hand, there were similar results for RC and the individual species with the different seasonal climate variables in the growing season (March-August). On the whole, the multispecies chronology showed similar climate responses and higher forced collective ecophysiological characteristics compared to *P. armandii* and *P. tabulaeformis* alone. This gives a suggestion that combination of species provide more valuable reference for regional dendroclimatic investigations compared to the use of one single species.

**Key Words:** tree ring; climatic change; *Pinus tabulaeformis*; *Pinus armandii*; multi-species chronology; temperate-subtropical ecological transition zone

树木的生长和立地环境密切相关并受气候变化的影响,树木年轮的变异能够真实地记录下每年有利或不利的因素。利用树木年轮宽度变异,可以获取定年准确、连续性强和分辨率高的代用资料,因而树木年轮宽度作为一个比较理想的代用指标,成为获取过去气候变化信息的重要手段之一<sup>[1]</sup>。极端环境(如高海拔林线、树木分布的边缘地带、群落交错带等)对气候变化较为敏感,因而成为树木年轮与气候变化研究的热点<sup>[1-3]</sup>。有些地区多种树木共同分布,有研究发现同一地点的不同树种对气候变化表现出相似的反应特征<sup>[4]</sup>,还有研究表明同一地区多物种联合年表能降低不同物种之间对的差异性反应<sup>[5]</sup>。可见,利用同一地点的多个物种样本建成的多物种联合年表可能比单物种年表更好体现当地的区域性气候特征<sup>[5-6]</sup>,相关研究也引起了人们的关注。

我国大量的树木年代学研究集中在通过单个树种重建寒冷和干旱地区<sup>[7-9]</sup>的气候变化,而温暖、湿润地区的树木年代学研究相对匮乏<sup>[10]</sup>。宝天曼国家级自然保护区位于伏牛山中段的南麓,地处典型的暖温带向北亚热带过渡区,以及我国第二级地貌阶梯向第三级地貌阶梯过渡的边缘。复杂多样的气候、地形条件促进了不同植物区系的交汇和融合,植被属暖温带落叶阔叶林向亚热带常绿阔叶林的过渡型<sup>[11]</sup>。华山松(*Pinus armandii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)是宝天曼自然保护区两种主要针叶树种,油松在海拔 1000m 至 1800m 之间和短柄栎(*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)形成针阔混交林,华山松分布在海拔 1200—2000m 和锐齿栎(*Quercus atiena* var. *acuteserota*)形成针阔混交林<sup>[12]</sup>。

已有研究表明伏牛山西南部龙池曼保护区内不同地点的油松和华山松受不同气候因子的影响,其中油松与 5—7 月平均最高温度负相关和 5 月降水正相关<sup>[13]</sup>,华山松与 5—6 月降水和 3 月份平均温度正相关<sup>[14]</sup>。然而,有关气候过渡带的宝天曼国家级自然保护区内树木年轮与气候变化的研究却鲜有报道。本文旨在研究宝天曼保护区主要针叶树种华山松和油松对气候变化的响应特征,并尝试建立区域性华山松和油松的联合年表,比较分析不同树种及其联合年表对气候变化的响应方式,进而分析宝天曼不同树木生长与气候变化的相关关系,探讨影响区域内树木生长的共同特征,为当地乃至整个伏牛山地区的森林生态系统维护提供一定的科学指导,进而对当地的树木年代学研究起到一定的促进作用。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

宝天曼国家级自然保护区位于河南省西南部,地处秦岭东段,伏牛山南坡(33°20′12″—33°35′43″N,111°46′55″—112°03′32″E),南北长 24.3 km,东西宽 25.9 km,总面积 23198 hm<sup>2</sup>。山体呈东南西北走向,最高峰宝天曼海拔 1830 m。年均气温 15.1°C,年均降水量 770.4 mm,土壤可划分为山地棕壤、山地黄棕壤和山地褐土 3 种,土壤 pH 值为 6.5 左右。

### 1.2 树木年轮宽度年表的建立

在宝天曼自然保护区分别选取华山松(33°30.445′N,111°56.549′E,海拔 1550m)和油松(33°29.699′N,111°56.095′E,海拔 1530m)样点,按照国际树木年轮数据库(I TRDB)的标准,分别选取 30 棵华山松和 35 棵油松,在其胸高处钻取树芯(每棵树钻取 1—2 个),共钻取 32 个华山松树芯和 38 个油松树芯装在塑料管中带回实验室。样品带回实验室后,根据通用的树木年轮分析基本程序,将树芯样本进行预处理、交叉定年,用 LINTAB 5 年轮测量和分析系统进行年轮宽度测量,精确到 0.001mm,并通过 COFECHA 程序<sup>[15]</sup>对交叉定年结果进行验证,消除定年和宽度测量过程中出现的主观误差,剔除那些相关性差、序列过短和奇异点过多的个别序列,分别剔除了几个华山松和油松树芯。另外,研究中发现多数华山松和油松样树的年龄都在 60 年左右,还有有几棵华山松和油松的年龄超过了 100 年,有研究证明同一树种的不同年龄阶段对相同气象因子的反应不同<sup>[16-17]</sup>,平均年龄 60 年左右的树木和年龄大于 100 年的同种树木对气候变化的响应不同<sup>[18]</sup>,因此本研究只选取相近年龄段的 24 棵华山松(1951—2010 年)和 26 棵油松(1959—2010 年),利用 ARSTAN 程序<sup>[19]</sup>建立油松和华山松的树木年轮宽度年表。为了保留更多的低频信号,本文主要采用传统的负指数函数进行去趋势。对于去趋势后与其他序列去趋势后的趋势差别很大的个别序列而言,利用步长大于总序列长度三分之二的样条函数进行去趋势,最后分别得出华山松和油松的标准年表。为了探讨同一地点不同树种对气候变化的响应方式,本文除了比较华山松和油松径向生长与气候因子变化的相关关系,尝试将 24 棵华山松和 26 棵油松树芯混合建成区域性联合(multi-species)年表,进而探讨宝天曼树木生长对当地气候变化的响应特征。

### 1.3 不同树种年表公共区间的相关分析

年表的起始年代以子样本信号强度 SSS(Sub-sample Signal Strength)系数来评估确定<sup>[20]</sup>,本文采纳 SSS>85%的样本量作为年表的起始点,高于该样本量的年表序列则认为是可靠的。为了检查不同树种对气候因子响应的异同,对华山松年表、油松年表和区域联合年表进行相关分析。

### 1.4 气象资料及数据分析方法

本文采用采样点附近的内乡气象站的气象资料(图 1),所用气候要素是自建站以来(1957—2009 年)的月平均气温、月降水量、月平均最高气温和月平均最低气温。宝天曼的降雨量主要集中于七、八月份,占全年降水量的 38%;最冷月 1 月份的平均温度为 1.7°C,7 月温度最高,为 27.4°C。鉴于气候因子对树轮宽度指数有一定的滞后作用,选取气象因子的时间段为上一年 10 月到当年 9 月,利用 Dendroclim2002 软件<sup>[21]</sup>分析各年表和气象因子之间的相关性,寻找同一地点不同树木生长的气候限制因子。

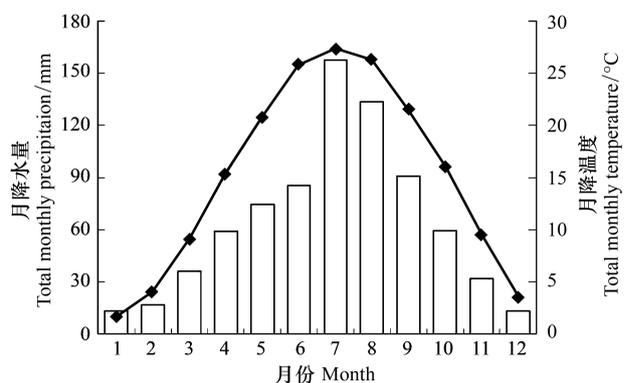


图 1 内乡气象站的月平均温度和月降水量

Fig.1 Monthly mean temperature and total precipitation from Neixiang meteorological station

## 2 结果与分析

### 2.1 不同树种的年表特征

油松和华山松的年轮宽度年表分别见图 2-PT 和 PA, 由所有华山松和油松样芯建成的联合年表见 RC。从图 2 可以看出, 油松 (PT) 和华山松 (PA) 及其联合年表 (RC) 的轮宽变化表现出一定的一致性, 其中在 1965、1967 年的轮宽值都很窄, 2009 年轮值都较宽。各年表的统计特征见表 1。在所用到的年表统计特征中, 平均敏感度是度量相邻年轮之间轮宽变化情况的指标, 用来说明树木生长对外界环境变化的敏感程度<sup>[1]</sup>; 信噪比是指气候信号 (气候方差) 与非气候因素造成的噪音 (非气候方差) 的比值<sup>[1]</sup>; 样本总体代表性是指 N 条时间序列的均值与总体之间的相关程度, 是一个表示子集序列对总体代表程度的统计量<sup>[20]</sup>。通常, 较高的一阶自相关系数和较低的平均敏感度 (MS) 意味着序列包含着较多的低频变化信息, 样本量总体代表性 (.TIF) 和信噪比 (SNR) 越高, 表明气候对树木生长影响越大<sup>[22]</sup>。从表 1 中可以看出, 华山松和油松的树木年轮宽度年表都具有较高的 .TIF 和 SNR, 说明它们的生长受气候影响较大。联合年表的 SNR 和 .TIF 都高于华山松和油松, 表明联合年表中包含较高的气候信息。

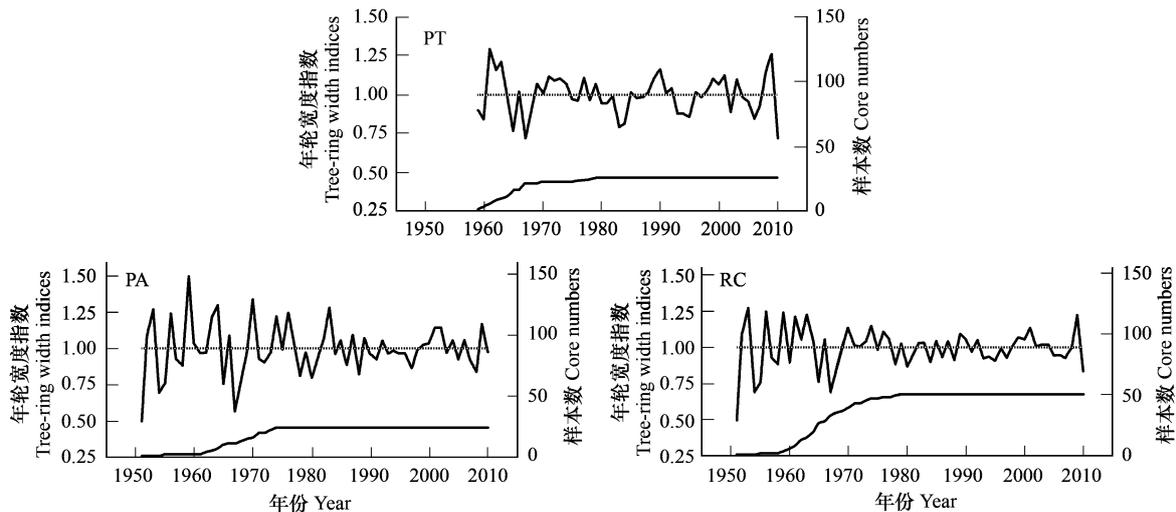


图 2 宝天曼华山松、油松及联合树木年表树轮宽度年表和样本量

Fig.2 Tree-ring width chronologies and the number of samplings for *Pinus armandii*, *Pinus tabulaeformis* and regional multi-species (*Pinus armandii* and *Pinus tabulaeformis*) in Baotianman National Nature Reserve

PT: 油松年表, PA: 华山松年表, RC: 油松-华山松的联合年表

表 1 宝天曼华山松和油松标准年表及其联合年表的基本统计量

Table 1 Characteristics of standard chronologies ring-width chronologies for *Pinus armandii*, *Pinus tabulaeformis*, and regional multi-species trees (*Pinus armandii* and *Pinus tabulaeformis*) at Baotianman National Nature Reserve

年表特征 Characteristics	油松 (PT) <i>P. tabulaeformis</i>	华山松 (PA) <i>P. armandii</i>	华山松-油松 (RC) <i>P. armandii</i> and <i>P. tabulaeformis</i>
样本量 Sampling cores in chronologies	26 树/26 芯	24 树/24 芯	50 树/50 芯
时段 Time span	1959—2010	1951—2010	1951—2010
平均敏感度 Mean sensitivity (MS)	0.172	0.219	0.155
标准误 Standard deviation (SD)	0.161	0.223	0.168
一阶自相关系数 First-order autocorrelation (AC1)	0.336	0.288	0.359
树间相关系数 Mean correlations between trees	0.256	0.259	0.213
SSS>85%起始年/样芯数 Year since SSS>85%/core	1962 / 9	1963 / 9	1963 / 19
信噪比 Signal-to-noise ratio (SNR)	7.672	8.041	8.141
总体代表性 Expressed population (.TIF)	0.885	0.889	0.891
第一主成分解释方差量 Variance in first eigenvector	32.43%	35.18%	26.18%

## 2.2 不同年表序列间的关系

为了分析同一地点不同树种径向生长之间的相关性,本研究比较分析了宝天曼华山松和油松树木年轮宽度年表及其联合年表之间的相关关系(表2)。由表2中可以看出,宝天曼地区华山松(PA)和油松(PT)的径向生长呈正相关( $P < 0.05$ ),年表变化趋势较为相似,联合年表(RC)与华山松(PA)和油松(PT)年表之间的相关性都达到了显著正相关( $P < 0.001$ )。相关分析结果表明,宝天曼华山松及油松的联合年表与它们的单物种树轮宽度变化有很好的一致性,联合年表含有较单物种年表更丰富的气候信息。

表2 宝天曼华山松、油松树木年轮宽度年表及其联合年表宽度序列在共同区间(SSS>85%的共同区间1963—2010年)的相关分析

Table 2 Characteristics of ring-width chronologies (SSS > 85% common interval time span 1963 to 2010) for *Pinus armandii*, *Pinus tabulaeformis*, and multi-species trees (*Pinus armandii* and *Pinus tabulaeformis*) at Baotianman National Nature Reserve

年表代号 (Code)	油松 (PT)	华山松 (PA)	油松-华山松 (RC)
油松 (PT)	1		
华山松 (PA)	0.265 *	1	
油松-华山松 (RC)	0.789 **	0.810 **	1

注: \*代表95%的置信水平, \*\*表示99%的置信水平

## 2.3 不同年表与气候要素的相关分析

将宝天曼油松、华山松树轮宽度年表分别与各气候因子进行相关分析,结果如图3所示。油松和华山松径向生长受月平均温度的影响较大,油松(图3-A1)除了和当年生长季5月份平均温度显著负相关,与上年12月份的温度显著正相关;华山松(图3-B1)和当年5、6月平均温度显著负相关。降水是影响宝天曼树木生长的另一重要因素,油松和华山松径向生长分别与4月份降水(图3-A1)和5月份降水(图3-B1)显著正相关。宝天曼油松和华山松树轮样芯建成的联合年表序列(RC)受上一年冬季温度和降水的影响不大,只和当年生长季5、6月平均温度的显著负相关,与4、5月份降水量显著正相关(图3-C1)。

不同月份的平均最高温度和最低气温也在一定程度上影响宝天曼华山松和油松的径向生长(图3-A2、B2、C2)。油松与当年5月的平均最高温度和上年11月最低温显著负相关,与当年3月平均最低气温显著正相关(图3-A2)。华山松与上年10月和当年4月的平均最高温度显著负相关,与上年12月和当年7月平均最低温度显著正相关(图3-B2)。而联合年表RC受上年冬季月平均最高和最低温度的影响都不大,综合了油松和华山松对当年生长季气候因子的响应方式,与当年3月最低温显著正相关,与当年7月最低温和4、5月最高温显著负相关(图3-C2)。

基于不同年表与各气候因子相关分析结果,将气候因子进行了当年生长季(3—8月)多种月份组合分析(表3)。从表3中可以看出,生长季后期(7—8月)平均的气候因子对三种年表的影响都不大,起作用的主要是生长季前期(3—4月)及中期(5—6月)不同组合的气候因子。其中,油松(PT)年表与4—5月平均最高温度和5—6月平均温度显著负相关,与月份组合的降水量及月平均最低温度的相关系数较低,油松受生长季早期4—5月最高温度和生长季中期5—6月份的平均温度影响较大。华山松年表(PA)与4—5月平均最高气

表3 油松与华山松年表与生长季(3—8月)内气候要素月份组合的相关分析

Table 3 Correlation analysis results of ring-width chronologies for *Pinus armandii*, *Pinus tabulaeformis*, and regional multi-species trees (*Pinus armandii* and *Pinus tabulaeformis*) and seasonal climate variables in growth season (March-August) from Neixiang meteorological station

年表代号 Code	月平均温度 Monthly mean temperature				月降水量 Monthly total precipitation				月平均最高温度 Monthly mean maximum temperature				月平均最低温度 Monthly mean minimum temperature			
	c34	c45	c56	c78	c34	c45	c56	c78	c34	c45	c56	c78	c34	c45	c56	c78
	PT	-0.01	-0.19	-0.35 *	-0.04	0.25	0.19	0.16	0.10	-0.12	-0.34 *	-0.23	-0.03	0.22	-0.07	-0.10
PA	-0.02	-0.17	-0.41 *	-0.18	0.05	0.36 *	0.18	0.04	-0.22	-0.36 *	-0.25	-0.06	0.01	-0.13	-0.10	-0.18
RC	-0.01	-0.22	-0.48 *	-0.15	0.17	0.37 *	0.21	0.07	-0.23	-0.43 *	-0.26	-0.04	0.14	-0.14	-0.02	-0.27 *

PT:油松年表,PA:华山松年表,RC:油松-华山松的联合年表;c代表当年,其后数字代表对应月份。\*: $P < 0.05$

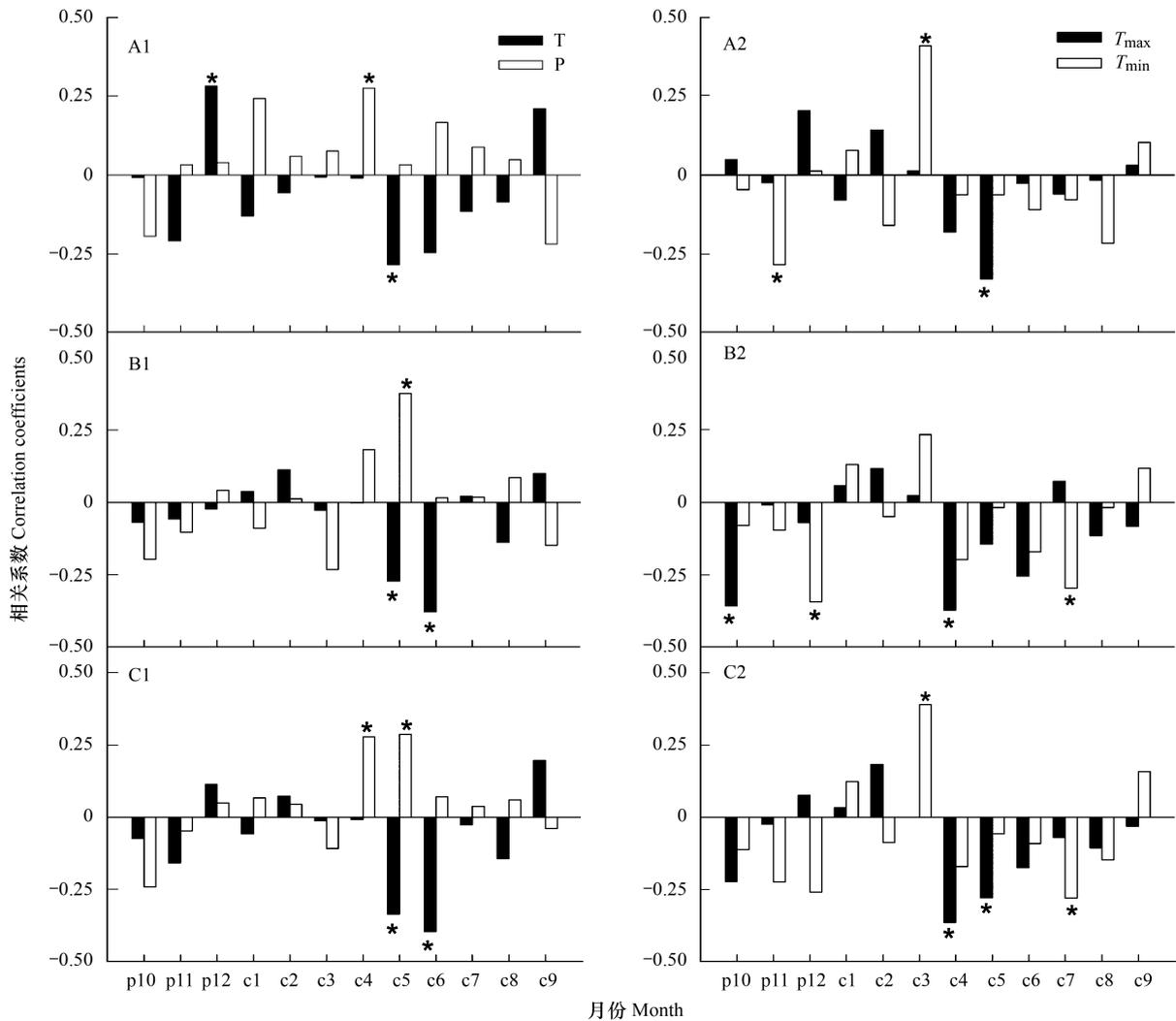


图3 油松、华山松年轮宽度年表及联合年表与与月均气温 ( $T_m$ )、月均最高气温 ( $T_{max}$ )、月均最低气温 ( $T_{min}$ ) 的相关系数

Fig.3 Correlation coefficients for chronologies of PA (*Pinus armandi*), PT (*Pinus tabulaeformis*) and RC (regional multi-species chronologies) and monthly mean temperature ( $T$ ), monthly total precipitation ( $P$ ), mean maximum temperature ( $T_{max}$ ), and mean minimum temperature ( $T_{min}$ ) from Neixiang meteorological station

A1、A2 为油松年表 (PT), B1、B2 为华山松年表 (PA), C1、C2 为油松-华山松的联合年表 (RC). 月份 p 代表上年时间序列, c 代表当年的时间序列, \* :  $P < 0.05$

温、5—6月平均温度显著负相关,与4—5月降水量显著正相关。而华山松和油松的联合年表(RC)则与较多气候因子的月份组合之间具有较高的相关系数,其中,与4—5月份的平均最高气温、5—6月平均温度、7—8月平均最低温度显著负相关,还与4—5月降水量达到显著正相关。

总的来看,联合年表 RC 对气候变化的响应与单一物种年表 PT (油松)、PA (华山松) 的响应方式既有相似之处,也有不同之处。单物种年表 PA 和 PT 除了受当年生长季气候因子的影响外,还受上年冬季不同气候因子的影响,而联合年表 RC 则突出了单物种年表 PA 和 PT 对当年生长季不同气候因子的响应关系。另一方面,联合年表 RC 与当年生长季(3—8月)不同月份组合的气候因子的相关性都较高,与相关月份组合气候因子的相关系数均高于油松 PT 和华山松年表 PA 与相关气候变量的相关性。可见,宝天曼油松和华山松的联合年表没有显示不同物种对上年冬季气候的差异性反应特征,反而加强了单物种年表受当年生长季气候变化影响的公共信号。

### 3 讨论

#### 3.1 同一地区不同树种对气候变化的响应

生长在同一气候区的华山松和油松,其生长对气候响应类似,都对生长季早期 4—5 月的降水正相关,和 5—6 月的平均温度负相关,这说明在研究区域内油松和华山松生长特性类似,控制两种树木生长的限制因子是相似的。生长季早期,较高的温度和充足的水分有利于树木的光合作用、细胞分裂及细胞壁加厚,从而产生宽轮<sup>[23]</sup>。温度过高则导致土壤湿度降低,所以表现出树木径向生长与生长季降水正相关,与同期温度负相关<sup>[24]</sup>。而盛夏(7—8 月)是树木生长旺盛时期,当地 7、8 月平均温度分别为 27.4℃、26.5℃,7—8 月份降水量约为 291mm,尽管温度较高,但充足的降水能满足油松和华山松的生长,此时的温度和降水都不成为它们生长的限制因子。

树木种类不同,生物学特征不同,对气候变化的响应特征以及敏感性强弱也有一定的差异<sup>[4]</sup>。宝天曼油松的径向生长和生长季 3 月份最低气温及 4 月的降水显著正相关,和 5 月份的温度显著负相关,这一结果和宝天曼附近的伏牛山<sup>[13]</sup>以及太行山<sup>[25]</sup>油松对气候变化的响应的结果相似。研究区域 3 月份温度已经回升,最低气温的升高有利于土壤的解冻,热量条件达到树木生长的需要,充足的降水更能促进宽轮的形成。生长季 5 月雨季还未到来,4—5 月份最低温度的升高会加强土壤水分的蒸发和植物的蒸腾,造成树木体内水分的快速散失,形成水分胁迫限制了树木的生长。油松的生长还和上一年冬季 12 月份温度正相关,温暖的冬季可以避免叶组织冻结,也可避免树木根系因土壤冻结而导致冻死,保证代谢活动正常,从而使树木的来年生长潜力增大<sup>[26]</sup>。

华山松是宝天曼林区另一重要针叶树种,华山松喜湿润凉爽的气候,高温及干燥是限制其分布和生长的主要因素<sup>[12]</sup>。研究表明华山松的径向生长和 3 月份降水、4 月份最高温度、5—6 月平均温度、7 月最低温度显著负相关。根据内乡气象站资料,内乡 3 月份平均温度 9.1℃,4 月份 15.4℃,3、4 月份降水分别为 36 mm、59 mm,春季温度达到适宜程度刺激树木形成层开始活动<sup>[24]</sup>,5—6 月份温度的高低决定了树木生长的快慢。华山松还和当年 5 月份的降水显著正相关,这一结果与徐康等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。树木生长季温度较为适宜时,降水就成了主要的限制因子<sup>[24]</sup>,水分的缺失抑制树木的生长。宝天曼降水主要集中在 7、8 月份,占全年降水量的 38%,7、8 月份充裕的降水对华山松生长的影响不大,而生长季前期充足的降水则保证了生长所需的水分,能促进华山松的生长。

#### 3.2 同一地区不同树种的联合年表对气候变化的响应

从不同月份的气候因子对树木生长的影响来看,由宝天曼油松和华山松样本组成的联合树轮年表(RC)综合了油松和华山松对当年生长季不同气候因子的响应方式,与当年 5、6 月平均温度和 4、5 月平均最高温度以及 7 月最低温度显著负相关,还与当年 3 月最低温度及 4、5 月降水显著正相关。基于不同年表与当年生长季(3—8 月)多种月份气候因子的组合分析也表明,联合年表 RC 与单物种油松(PT)和华山松(PA)对气候变化的响应类似,分别与生长季前期(4—5 月)的平均最高温度,以及生长季中期(5—6 月)的平均温度和后期(7—8 月)平均最低温度显著负相关,还与 4—5 月降水量达到显著正相关,而且相关系数都高于油松(PT)和华山松(PA)分别对相同气候因子的响应,突出了两个物种对生长季相同气候因子的共同响应方式,反应出区域性树木生长对气候变化的响应特征。

Maxwell 等<sup>[28]</sup>研究证明在多物种共存的大范围林分内,虽然环境因素和林分动态通过不同的方式影响树木生长,采自同一林分的树芯宽度序列经过仔细标准化后所生成的不同物种年表包含共同的气候信息,尤其是在多物种的干旱地区能提供更多的气候信息。吴普等人<sup>[4]</sup>对五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性进行了研究,结果表明生长在同一地区的不同树木由于受到相似的气候变化影响而呈现类似的响应特征。Lebourgeois 等<sup>[5]</sup>的研究也表明同一地区多物种联合年表能够体现不同物种区域性的共同生态生理特征,至少能降低不同物种之间对气候的差异性反应。多物种联合年表为在区域性气候变化研究中受到重视,

全球很多地方利用多物种联合年表成功地重建了径流量<sup>[29-31]</sup>和不同季节的气候变化<sup>[6]</sup>。García-Suárez 等人<sup>[6]</sup>利用同一地点五个不同的阔叶和针叶树物种相互组合建成联合年表,分别与单月或季节气候变量进行相关分析,研究发现不同树种的联合年表比单树种年表包含更多的气候信息,能够更好地重建过去的气候变化。采自宝天曼同一地区的油松和华山松由于生理特性的不同导致其对相同气候变化的反应会有一些的差异性,多树种的联合年表一定程度上能弱化这种因生理生长差异性而产生的对气候变化反应的差异性,体现出同一地区不同树木对气候变化响应的区域性特征,为同地区建成多树种联合年表来探讨当地区域性气候变化的提供了可行性的理论基础。

#### 4 结论

本文以宝天曼的油松和华山松为研究对象,分别建立油松和华山松的年轮宽度年表(PT, PA)及其联合物种年表(RC),研究不同年表和气候变化的相关关系。研究表明宝天曼地区油松(PT)和华山松(PA)对气候变化的响应有一定的相似性,生长季(3—8月)温度和降水是影响该地树木径向生长的重要因素。其中,生长季前期(4—5月)的平均最高温度、生长季中期(5—6月)的平均温度和后期(7—8月)的平均最低温度都和树木径向生长显著负相关,生长季前期(4—5月)的降水量和树木生长显著正相关。

华山松和油松的联合年表(RC)则包含了更多的气候信息,综合了单物种油松和华山松对气候变化的响应关系,并加强了单物种年表受当年生长季气候影响的公共信号,一定程度上体现了宝天曼树木生长对气候变化的区域性特征,进一步印证了同一地区不同树木的联合年表能反映当地区域性的共同气候变化特征,为分析宝天曼区域森林生态系统受气候变化的影响以及为古气候的重建提供了新的研究思路。为了精确、全面地评估气候变化对森林生态系统的影响,消除单一树种的局限性,多树种综合的生态响应研究受到了关注<sup>[32]</sup>,但有关区域性多物种联合年表的可行性还需在更多地点、建成较多物种的联合年表来检验。

**致谢:**感谢中科院植物研究所张齐兵研究员和邱红岩老师以对本研究工作的指导和帮助,宝天曼国家级自然保护区管理局对野外工作的支持,作者在此一并表示衷心感谢。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Fritts H C. Tree Rings and Climate. London: Academic Press, 1976.
- [ 2 ] Bogino S, Nieto M J F, Bravo F. Climate effect on radial growth of *Pinus sylvestris* at its southern and western distribution limits. *Silva Fennica*, 2009, 43(4): 609-623.
- [ 3 ] Liang E Y, Shao X M, Xu Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 98(1/2): 9-18.
- [ 4 ] 吴普, 王丽丽, 黄磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性. *地理研究*, 2006, 25(1): 43-52.
- [ 5 ] Lebourgeois F, Mérian P, Courdier F, Ladier J, Dreyfus P. Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees*, 2012, 26(3): 715-729.
- [ 6 ] García-Suárez A M, Butler C J, Baillie M G L. Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: a multi-species approach. *Dendrochronologia*, 2009, 27(3): 183-198.
- [ 7 ] 刘禹, 安芷生, Linderholm H W, Chen D L, 宋慧明, 蔡秋芳, 孙军艳, 田华. 青藏高原中东部过去 2485 年以来温度变化的树轮记录. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2009, 39(2): 166-176.
- [ 8 ] 勾晓华, 杨涛, 高琳琳, 邓洋, 杨梅学, 陈发虎. 树轮记录的青藏高原东南部过去 457 年降水变化历史. *科学通报*, 2013, 58(11): 978-985.
- [ 9 ] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 李兴欢, 刘瑞鹏, 黄唯, 孙涛, 赵晶. 凉水自然保护区不同皮型红松径向生长对气候的响应. *应用生态学报*, 2014, 25(9): 2511-2520.
- [ 10 ] 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 曹春福, 陈亚君, 周非飞. 树木年代学的研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1879-1888.
- [ 11 ] 尚富德, 王磐基, 冯广平, 曾颖, 王正德. 伏牛山南北自然过渡地带植物多样性的特征及其成因分析. *河南大学学报(自然科学版)*, 1988, 28(1): 54-60.

- [12] 方艾. 华山松林 //《河南森林》编辑委员会. 河南森林. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [13] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 包光, 王伟平, 薛文亮, 朱文杰, 宋慧明, 雷蓓. 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.
- [14] 王婷, 沈连峰, 叶永忠, 高海强, 徐萌. 伏牛山华山松径向生长对气候变化的响应. 河南科学, 2010, 28(12): 1549-1551.
- [15] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43(1): 69-78.
- [16] Carrer M, Urbinati C. Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology*, 2004, 85(3): 730-740.
- [17] Mérian P, Lebourgeois F. Size-mediated climate - growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(8): 1382-1391.
- [18] Schuster R, Oberhuber W. Age-dependent climate-growth relationships and regeneration of *Picea abies* in a drought-prone mixed-coniferous forest in the Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, 43(7): 609-618.
- [19] Cook E R, Holmes R L. Users manual for program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research. Tucson: University of Arizona, 1986.
- [20] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [21] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, USA? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, 32(2): 111-116.
- [22] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Netherlands: Springer, 1990.
- [23] Liang E Y, Shao X M, Qin N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2008, 61(3-4): 313-320.
- [24] 尹训钢, 吴祥定. 华山松树木年轮对气候响应的模拟分析. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 257-264.
- [25] 彭剑峰, 杨爱荣, 田沁花. 万仙山油松径向生长与气候因子的关系. *生态学报*, 2011, 31(20): 5977-5983.
- [26] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. *第四纪研究*, 1999, 1(1): 81-89.
- [27] 徐康, 王晓晖, 于明涛, 王棒, 关文彬. 宁夏六盘山华山松年轮年表对生态气候指标的响应. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 86-90.
- [28] Maxwell R S, Hessl A E, Cook E R, Pederson N. A multispecies tree ring reconstruction of Potomac River streamflow (950 - 2001). *Water Resources Research*, 2011, 47(5): W05512.
- [29] Pederson N, Jacoby G C, D'Arrigo R D, Cook B R, Buckley B M, Dugarjav C, Mijiddorj R. Hydrometeorological reconstructions for northeastern Mongolia derived from tree rings: 1651-1995. *Journal of Climate*, 2001, 14(5): 872-881.
- [30] Frank D, Esper J. Temperature reconstructions and comparisons with instrumental data from a tree - ring network for the European Alps. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(11): 1437-1454.
- [31] Hart S J, Smith D J, Clague J J. A multi-species dendroclimatic reconstruction of Chilko River streamflow, British Columbia, Canada. *Hydrological Processes*, 2010, 24(19): 2752-2761.
- [32] 李腾, 何兴元, 陈振举. 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应—以千山为例. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1841-1848.