

我国西南地区喀斯特森林树木年轮对气候变化的响应

许海洋^{1 2 3} 刘立斌^{1 2 3} 郭银明^{1 2 3} 梁辉⁴ 倪健^{1 3 5*}

(1.中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081; 2.中国科学院大学,北京 100049;
3.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100; 4.荔波县林业局,贵州 荔波 558400;
5.浙江师范大学 化学与生命科学学院,浙江 金华 321004)

摘要:利用贵州省2个典型喀斯特地区与1个非喀斯特地区的6个优势树种(化香树 *Platycarya strobilacea* 为重复树种)的树轮宽度资料,建立了6个树轮宽度年表,研究了不同地区不同树种的树木年轮对近50年来气候变化的响应异同,探讨了影响6个优势树种生长的气候限制因素。结果表明,季风期前的水热条件是喀斯特地区针叶树和阔叶树径向生长的最主要的气候限制因素。季风期前降水减少、月均温升高,导致土壤水分蒸发加快,加强了水分胁迫,不利于喀斯特地区针叶树和阔叶树的生长。帕尔默干旱指数虽表明喀斯特地区未达到干旱胁迫程度,但实际上水分渗漏加剧了喀斯特地区针叶树和阔叶树生长的水分胁迫。非喀斯特地区采样点的高海拔导致的低温,减少了春冬季节土壤水分蒸发。并且非喀斯特地区土壤和地形有利于水分涵养,同时,较高海拔的地形改变了季风期前的降水格局,消除了季风到来前树木生长的降水限制,因此,降水并不是喀斯特地区树木生长的限制因子;但其针叶树的径向生长受到上一年12月的温度控制,产生正响应信号,阔叶树径向生长仅受到生长季温度、降水增加带来的较小促进。

关键词:喀斯特森林; 树木年轮; 季风; 气候响应

中图分类号: Q948.112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2018)01-0023-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2018.46.004

全球CO₂浓度升高引发的全球变化,包括全球表面增温、降水格局改变、极端气候事件的发生频率增加等,尤其是持续的增温趋势对地球环境产生了深刻的影响^[1]。因此,需要精确追溯历史时期全球温度变化的过程,预测未来气候变化带来的影响,促进人类对气候变化的深入了解。黄土、泥炭、冰芯、石笋、孢粉、珊瑚和树木年轮等气候代用指标,能够记录气候变化的信号,被广泛应用于历史时期气候的重建^[2]。其中,树木年轮资料具有定年准确、分辨率高、连续性强和分布广泛的特点^[3-6],是定量重建过去气候变化的首选代用指标。

国内外在树木径向生长对气候变化因子响应的大量研究表明,树木径向生长的气候限制因素主要有温度、降水以及水热综合因素。温度过低或过高都不利于树木径向生长,例如Way和Oren^[7]的研

究发现,热带树木相对于温带以北的树木,对全球温度升高引起的生产力下降的响应更为敏感。Vlam等^[8]预测全球的增温趋势,将导致热带树木的生长速率下降,温度高于其最适宜生长温度反而对生长不利。冬季降雪量增大对树木生长产生低温限制,延缓了树木年轮形成层的生长,导致来年树轮为窄轮^[9-10]。在温度较适宜的条件下,降水增加一般对树木径向生长有利,例如上一年七八月份的降水增加,有利于光合产物的积累以及延长生长季^[11-12]。而冬季降水可对生长季前土壤水分有补充作用,以及延长生长季长度的作用^[13]。温度和降水条件相互制约,当任何一方对树木径向生长都不起决定性作用时,水热综合条件共同对树木径向生长起促进或抑制作用,例如温暖的冬季和充足的冬春季降水共同作用,可促进春季早材的形成^[14];而

收稿日期: 2017-04-20 改回日期: 2017-07-17

基金项目: 国家全球变化重大科学研究计划项目(2013CB956704); 国家自然科学基金项目(41471049); 环境地球化学国家重点实验室开放课题(SKLEG2017911)。

第一作者简介: 许海洋(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为生态环境地球化学。E-mail: xuhaiyang1991@hotmail.com。

* 通讯作者: 倪健(1968-),研究员,博士生导师,主要从事宏观尺度全球变化生态学、喀斯特植被生态学和古生态学研究。E-mail: nijian@vip.skleg.cn。

夏季较低的温度减缓了植物蒸腾作用,伴随充足的夏季降水,有利于土壤水分的涵养,对树木年轮的生长有利^[15],反之则起到抑制作用。从全球范围来看,树木径向生长对温度和降水既有正响应又有负响应,因地区、树种等条件而异。

目前,国内多地已建立长时间序列的树轮年表,进行了大量的气候重建,以及树木生长对气候的响应分析。研究区包括西北地区的秦岭华山^[16]、青海阿尼玛卿山地区^[17]、新疆伊犁^[18]、新疆阿尔泰山地区^[19]、东北地区的长白山^[20]、北方地区的内蒙古包头^[21],以及中国西部的青藏高原地区^[22-25]。其中,青藏高原地区的高海拔条件对树木生长具有气候限制,是国内树轮研究的理想地区。另外,南方地区已有少量树轮与气候关系的研究,如云南东北部横断山脉中部的夏季温度树轮重建^[26],以及东南部福建省的树轮宽度对当地气候变化的响应研究^[27]。

由此看来,国内树木年轮的研究区域集中分布于东北、西北以及青藏高原地区,并以针叶树为主,而在西南喀斯特地貌区的树木年轮研究尚未见报道。中国的西南地区广泛发育石灰岩和白云岩的岩溶地貌,且集中分布于滇黔桂地区,占中国领土面积的36%以及全球喀斯特面积的15.6%^[28]。喀斯特地区山地陡峭、岩石裸露率高、地形复杂,导致野外采样工作困难^[29-30]。目前,由于传统的树木年代学研究在非常态地貌的西南喀斯特地区匮乏,我们尚不清楚气候变化如何影响喀斯特地区树木生长,仍有待于进一步研究。

因此,本研究以贵州省喀斯特与非喀斯特地区适合定年的6种优势树木作为研究对象。通过树木年代学基本方法,建立6种优势树木的树轮年表,研究过去50年来气候变化对树木径向生长的影响,探究针叶树与阔叶树、喀斯特与非喀斯特因素的差异导致树轮宽度对气候响应的异同。这对于了解贵州典型喀斯特地貌的树木生长与当地气候条件的关系具有一定的参考价值,并可推进我国西南喀

斯特地区的树木年代学研究。

1 研究区域概况

黔中普定县后寨河流域的高原型喀斯特地貌,以及黔南荔波县茂兰喀斯特森林国家级自然保护区的峰丛洼地喀斯特地貌,均属于贵州省典型的喀斯特地貌,而黔东南雷公山国家级自然保护区具有典型的中国南方亚热带非喀斯特山地地貌特征(图1)。三地均处于纬度相近的亚热带季风区,生长季节降水充沛,具有雨热同期的特点,且植被保存完好,人类活动干扰较少。但雷公山采样点的海拔高度高于两个喀斯特地区,导致其年均温与喀斯特地区的差异较大(表1)。普定森林为喀斯特次生常绿与落叶阔叶混交林,其在天龙山的优势树种均为阔叶树;而茂兰森林为喀斯特原始常绿与落叶阔叶混交林,雷公山森林为典型常绿阔叶林,这两个地区均分布着马尾松和杉木等针叶树种,其中茂兰地区的树种生长于碳酸盐岩与非碳酸盐岩共存的地貌上。三地自然生态环境有一定差异,非喀斯特地区的土壤发育良好(偏酸性或中性),植被较为茂盛,而两个喀斯特采样地区虽然植被和土壤相对保护完好,但土层浅薄、基岩裸露率均在50%以上,土壤偏钙碱性,且已有研究表明,喀斯特水土条件不利于植物的生长^[31]。

2 采样与数据处理

2.1 年轮样品采样与处理

本研究选取普定天龙山、茂兰和雷公山地区共14种常绿和落叶优势乔木树种(部分树种重复)用于树轮采样。在采集树芯时,为了保证年轮序列更长,应尽量选取胸径大的成熟树木。为了提高统计的显著性,选择树木的样本量为每个树种20~30株。每棵树在胸径位置(1.3 m)附近,用生长锥

表1 树芯采样信息

Table 1 Sampling information of tree cores

采样点概况	采样点					
	普定		茂兰		雷公山	
海拔高度范围	1 100~1 400 m		430~1 078.6 m		1 000~2 179 m	
海拔高度	1 427 m	1 409 m	783 m	697 m	1 782 m	1 603 m
水热条件	年均温 15.1 °C, 年降水 1 390 mm		年均温 15.5 °C, 年降水 1 752 mm		年均温 9.7 °C, 年降水 1 375 mm	
采样位置	26°14' N, 105°45' E		25°13' N, 107°51' E		25°18' N, 107°58' E	
坡度	0°~25°	20°~65°	30°~50°	5°~10°	30°~70°	10°~30°
树种	化香树	安顺润楠	化香树	马尾松	白栎树	华山松
	<i>Platycarya strobilacea</i>	<i>Machilus cavalieriei</i>	<i>Platycarya strobilacea</i>	<i>Pinus massoniana</i>	<i>Pterostyrax psilophyllus</i>	<i>Pinus armandii</i>
芯(树)	47(26)	41(21)	35(18)	37(20)	42(23)	39(25)

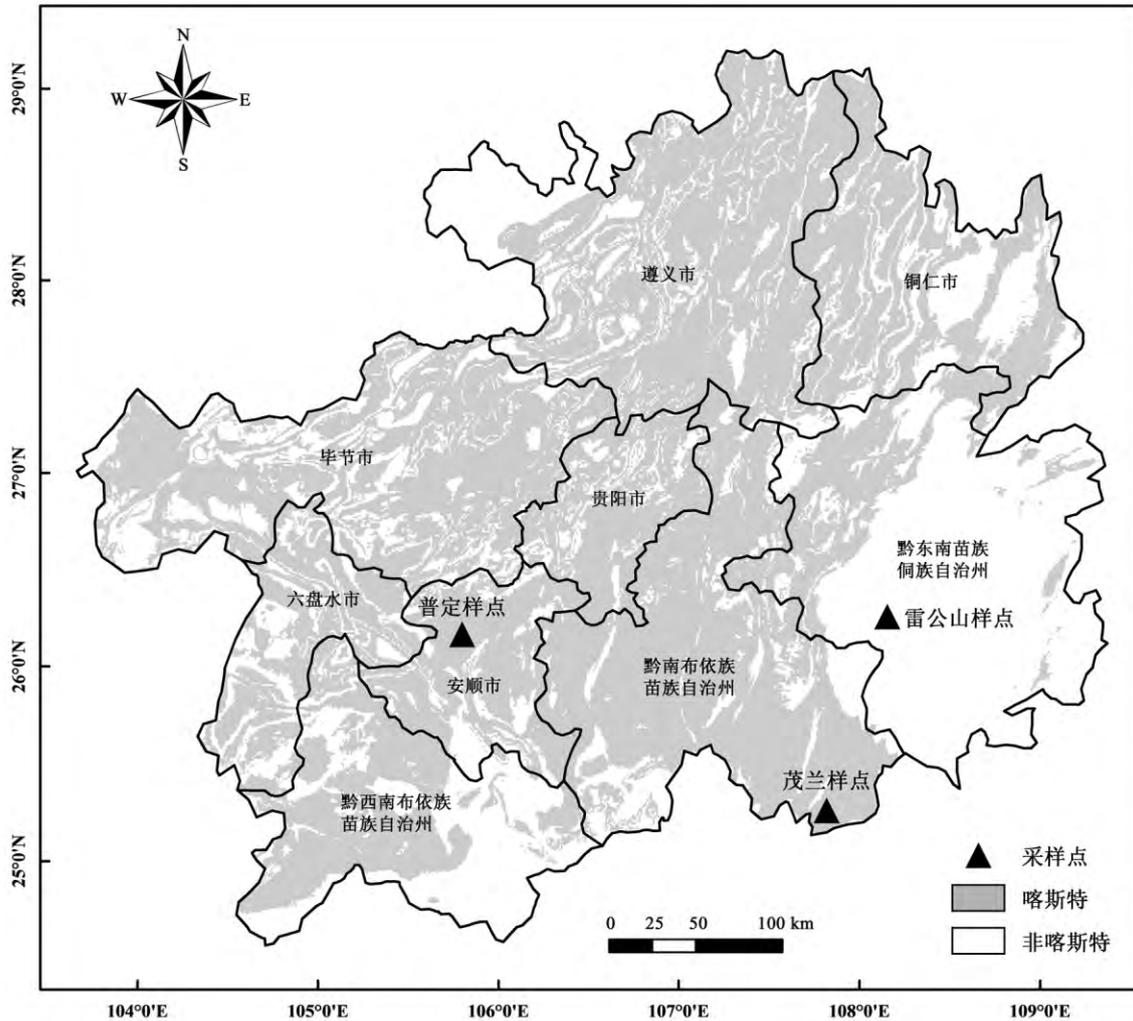


图 1 贵州省喀斯特地貌及采样点位置

Fig.1 Karst landform of Guizhou Province and sampling locations

(Haglof, 瑞典) 沿交叉方向钻取 2 个树芯, 用纸筒封装好, 并记录下采样点的经纬度、坡度、树高和胸径等信息。把树芯带回实验室自然风干后, 将树芯粘于特制的木质凹槽中, 经 240 目、600 目和 800 目的砂纸逐级打磨后, 剔除腐烂、年轮不清以及树轮不规则的树芯。因为大部分树种存在树芯腐烂、年轮不清等状况, 无法进行树木年代学研究, 所以最终只保留了来自 6 个优势树种(化香树为重复树种)且年轮清晰的树芯用于定年(表 1)。

使用德国 Frank Rinn 公司的 LINTAB 5 树木年轮仪(精度为 0.01 mm) 测得树轮宽度序列, 利用 COFECHA^[32] 程序辅助交叉定年。在检验过程中, 与树轮序列整体相关性较低的样本被剔除或重测, 最后得到与整体轮宽序列相关性较高的树轮序列, 用于年表研制(表 2)。利用 ARSTAN^[33] 程序, 选择样芯平均长度 2/3 的样条函数去除树木生长趋势^[34]。最后, 合成了三种树轮年表: 标准年表、差值年表和自回归年表。其中标准年表保留了较多与

表 2 树轮年表数据统计

Table 2 Statistical data of tree-ring chronologies

标准树轮年表特征统计	普定		茂兰		雷公山	
	化香树	安顺润楠	化香树	马尾松	白栎树	华山松
年表时间跨度	1966~2015	1961~2015	1915~2015	1975~2015	1874~2015	1973~2015
序列间相关系数	0.684	0.532	0.584	0.577	0.537	0.592
平均敏感度	0.390	0.449	0.374	0.316	0.359	0.314
原始树轮宽度一阶自相关	0.482	0.470	0.633	0.578	0.616	0.706
标准年表一阶自相关	0.226	0.113	0.332	0.094	0.181	0.224

气候相关的低频信号,可进一步用于分析与气候的关系。

2.2 气象数据及其与树轮关系分析

由于超过 50 年的树芯样本量较少,用于分析年表与气候变化关系的可靠性较低,因此选择近 50 年来的气象数据进行分析。国内气象站记录的气象数据靠近城市,且与采样点的海拔高度不同,不能准确代表采样点的气候特征。因此,利用中国气象数据网和贵州气象局提供的全省 88 个气象台站在 1951~2014 年间的月均温(MMT)、月降水(MMP)和日照百分率记录,通过薄板光顺样条曲面拟合方法^[35]以及基于 1 km 的 SRTM 数字高程模型^[36]插值获得贵州省气象数值的空间分布,分别提取 3 个采样点坐标位置的月均温和月降水数据,用于相关分析和响应分析。为了解干旱程度对树木径向生长带来的影响,通过 KNMI 网站(<http://climexp.knmi.nl>)从 CRU 气象数据库中提取 1951~2014 年间与采样点位置最近且分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的逐月帕尔默干旱指数(PDSI)。3 个地区的气候特征见图 2。

截取长年表与短年表相同的部分作两两相关分析,分析不同年表间相关性是否显著。利用软件 DENDROCLIM2002^[37]输入 MMT、MMP 和 PDSI 气象插值数据,与标准年表的树轮指数序列作置信区间为 95% 的引导相关分析。由于树木年轮生长的“滞后效应”,当年的年轮宽度通常受到上一年生长季气候条件的影响^[11],因此,选择研究的月份长度为 16 个月,即从上一年六月份(p6)到当年的 9 月份(c9),其中,用 p 表示上一年, c 表示当年。

3 结果与讨论

3.1 年表特征

大部分树种的年表长度在 40~50 年左右,茂兰的化香树长达 101 年,雷公山的白桦树也超过了 120 年(表 2)。平均敏感度介于 0.15~0.80 的树轮年表,受到气候条件限制较大,该数值大于 0.2,就被认为适用于分析年表的树轮指数与气候变化的关系^[38-39],而 6 个年表敏感度均大于 0.3,说明树轮宽度变化对气候变化的信号敏感。一阶自相关

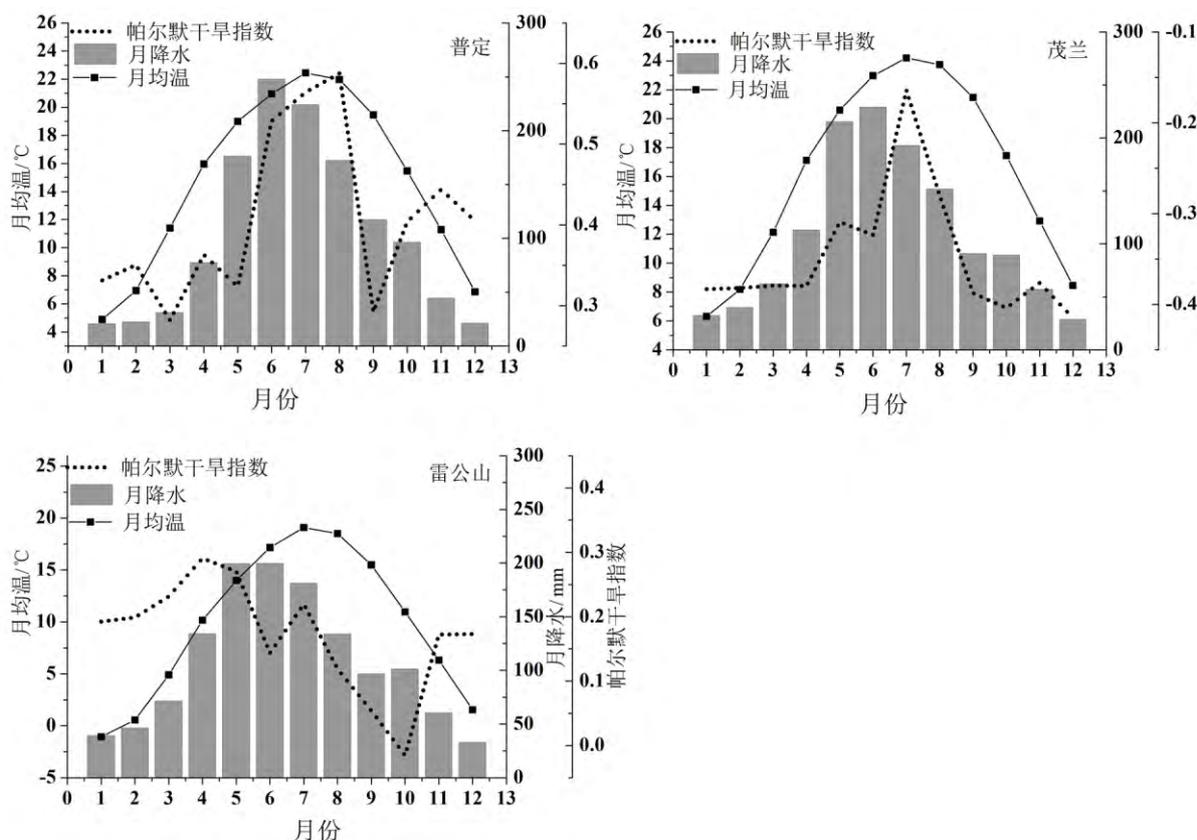


图 2 普定、茂兰和雷公山采样点 1951~2014 年月均温、月降水和月帕尔默干旱指数均值

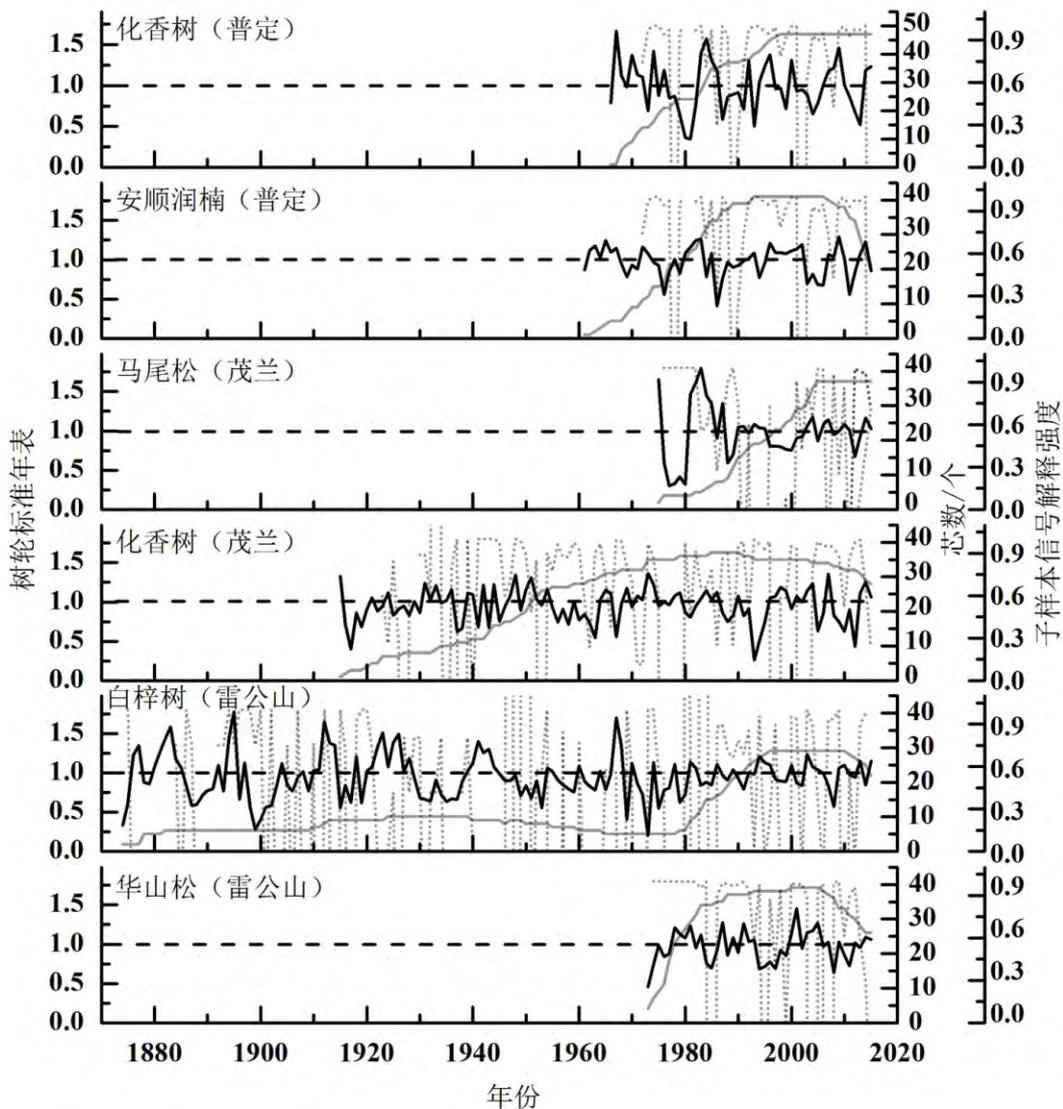
Fig.2 Mean value of monthly mean temperature, monthly mean precipitation and Palmer drought severity index of sampling sites in Puding County, Maolan area and Leigongshan Mt. during 1951-2014

是上一年轮宽变化对下一年轮宽变化影响的相关系数,年表的质量越高,一阶自相关性越小^[40],与原始年轮宽度的自相关性相比,得到的标准年表的一阶自相关性下降,因此,部分消除了树木生长趋势信号的干扰,保留了较多的气候相关信号(表 2)。

图 3 中,树芯样本量越多的年份,越具有代表性,样本量最集中的年代基本集中于 1951 年以后,更具有统计意义。EPS>0.85 的年份的树轮指数具有较高的可信度,说明样本具有的气候信号可作为总体的信号特征^[41]。与其他气候限制较大的地区树木年代学统计的 EPS 相比,所有 6 个树种均没有特别稳定的信号表达,也表明了中国南方地区树木

年轮宽度序列的变异性较大,对气候变化的敏感性较低。如果没有较强的气候因素影响,难以产生共同的稳定响应信号。

三个地区间的 6 个年表,除了普定与茂兰两个喀斯特地区的化香树分别与非喀斯特地区华山松、白桦树年轮指数显著负相关($p < 0.05$)外,其余不同树种之间的生长,不存在直接的关系(表 3)。从喀斯特、非喀斯特地区树种间树轮指数相似度来看,喀斯特地区的 4 个树种树轮指数的序列相似性小,非喀斯特的针叶树与阔叶树的树轮指数变化的正相关性也不显著($p > 0.05$)。喀斯特地区的两种化香树(阔叶树)之间并无明显的相关关系,可能是



树轮指数平均值为 1 时,指未受气候干扰的树轮宽度正常生长曲线,平均值 1+ 的年份的气候条件促进了树轮宽度的生长,平均值 1- 表明该年气候条件不利于树轮宽度的增长。
图 3 6 种树木年轮标准年表(黑色实线)、树芯个数(灰色实线)与子样本信号解释强度(EPS,灰色点线)

Fig.3 Standard chronologies of 6 tree species (black line), core number (gray line) and expressed population signal (EPS , gray dot line)

表3 6个树种标准树轮年表相关矩阵分析

Table 3 Correlation matrix analysis of standard tree-ring chronologies

项目	普定(化香树)	普定(安顺润楠)	茂兰(马尾松)	茂兰(化香树)	雷公山(白栎树)	雷公山(华山松)
普定(化香树)	1					
普定(安顺润楠)	0.078	1				
茂兰(马尾松)	0.199	0.177	1			
茂兰(化香树)	0.114	0.008	0.044	1		
雷公山(白栎树)	0.265	-0.053	0.061	-0.200*	1	
雷公山(华山松)	-0.323*	0.048	0.021	-0.096	0.262	1

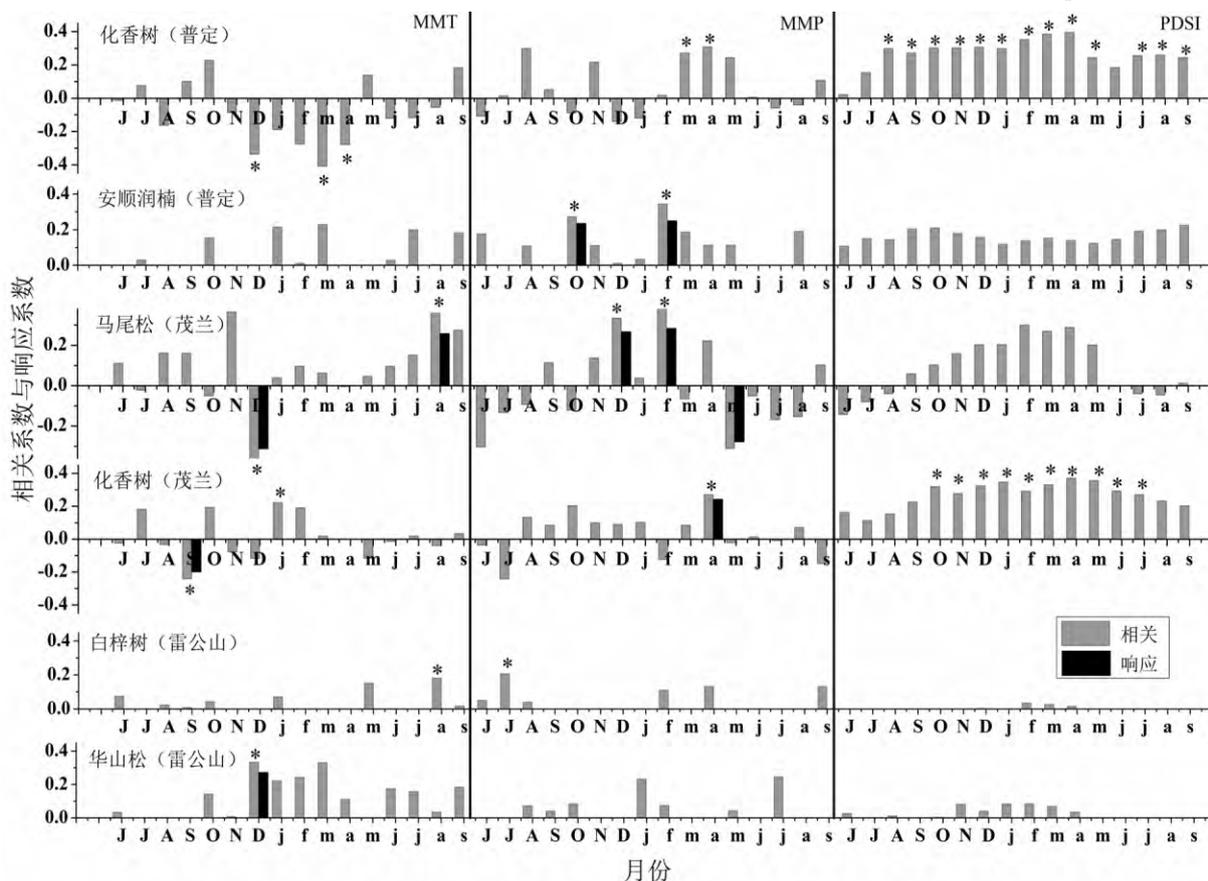
注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关

普定化香树(50年左右)和茂兰化香树(50~100年)的年龄结构不一致、两地小生境差异较大导致。喀斯特与非喀斯特地区树种生物学特征、气候因素和土壤因素差异,均可导致树轮标准年表信号不一致。

3.2 气候响应分析

图4显示,如果忽略树种差异,只讨论喀斯特与非喀斯特条件下树轮对气候的响应,则喀斯特地区

树种包含的气候信号多于非喀斯特地区树种。普定的化香树与雷公山的白栎树均未表现出对气候的响应,而其他4种树种均表现出了对气候变化的响应。所有树种中,只有两个喀斯特地区的化香树分别表现出对帕尔默干旱指数(PDSI)的显著正相关性($p < 0.05$),且普定的化香树径向生长与 $p8 \sim c9$ 的PDSI显著正相关($p < 0.05$),茂兰的化香树与 $p10 \sim c7$ 的PDSI均有显著的正相关关系($p < 0.05$)。喀斯



上一年月份缩写为首字母大写,当年缩写为首字母小写,MMT,MMP,PDSI分别表示月均温、月降水以及逐月帕尔默干旱指数,*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关

图4 标准年表与采样点 $p6 \sim c9$ 的月均温、月降水和逐月帕尔默干旱指数之间置信区间为 95% 的响应分析

Fig.4 Climatic response analysis of standard chronologies to the monthly mean temperature, monthly mean precipitation and monthly PDSI during previous June to current September

特地区大部分树种径向生长表现出了与上一年末月均温的负相关或负响应,其中,茂兰的化香树与马尾松分别对 p_9 、 p_{12} 的月均温有负响应,且马尾松对 c_8 的月均温有正响应,而非喀斯特雷公山的华山松仅对 p_{12} 的月均温有正响应,受 p_{12} 月均温的控制,并且 c_3 的月均温对其径向生长也有一定促进作用,相比华山松,白桉树径向生长与 c_8 的月均温有显著正相关性 ($p < 0.05$)。喀斯特地区的树种对月降水的响应集中于 $p_{12} \sim c_5$,非喀斯特树木对月降水均无响应,说明其径向生长与降水信号不同步,仅有白桉树的径向生长受到 p_7 月降水一定的促进作用 ($p < 0.05$),但其径向生长信号与降水信号并不同步,说明降水不是非喀斯特地区最主要的限制因子。

3.2.1 树木径向生长对温度的响应

喀斯特地区的马尾松与非喀斯特地区的白桉树的径向生长,与当年 8 月份的月均温呈显著正相关 ($p < 0.05$),且马尾松当年轮宽呈正响应(图 4)。8 月份为生长季节,光合作用处于较强的时期,适当的温度提升对马尾松和白桉树光合作用速率的增加有利。其他树种在生长季 ($c_5 \sim c_{10}$) 均未表现出与 MMT 的相关性,说明生长季 MMT 并不是限制其他树种当年径向生长的限制因子。

同为针叶树的马尾松和华山松对 p_{12} 月均温的响应正好相反。事实上,马尾松所在地区的 12 月份月均温 ($8.4\text{ }^\circ\text{C}$) 高于华山松生长地区月均温 ($1.5\text{ }^\circ\text{C}$) (图 2),这是两者产生差异的原因之一。上一年 12 月份树木的光合作用几乎停滞而呼吸作用依然存在,对于喀斯特地区的马尾松来说, p_{12} 月均温越高,使得树木的呼吸作用消耗大于光合作用合成,不利于下一年生长养分的积累,下一年易形成窄轮;而对于非喀斯特地区的华山松来说,若 p_{12} 的月均温升高,避免了雷公山上一年 12 月接近冰点的温度对植物组织细胞的冻伤,且有利于针叶树形成层的再生^[11,14,42],下一年易形成宽轮。茂兰的化香树与同地区的马尾松相比,化香树当年轮宽与 p_9 的月均温具有负响应,与马尾松当年轮宽对 p_{12} 月均温的响应机制类似。而两者呈负响应的月份不同,区别可能在于化香树为落叶阔叶树种,9 月份是其落叶开始的阶段,光合作用逐渐减弱,因此,上一年 9 月份较高的温度,延长了其进入休眠期的时间,促进了树木对自身有机质的消耗,不利于下一年的生长^[43]。对于喀斯特地区树种,季风期前的冬春季节,即上一年末到下一年初 ($p_9 \sim c_4$) 的月均温升高

反而对喀斯特地区的树种当年轮宽增加有一定的抑制作用。在季风带来大量降水前的冬春季节的月均温升高,对当年树轮宽度有抑制作用。

3.2.2 树木径向生长对降水的响应

冬春季节降水的减少,是导致土壤湿度减小、树轮形成窄轮的重要限制因子^[44],而季风期的温度升高以及带来的充足降水满足了树木生长季内的温度和水分需求^[45]。因此,对处于季风区的三个采样点,季风期前 ($p_{11} \sim c_4$) 的降水对喀斯特地区树种构成了水分限制,而雨季 ($c_5 \sim c_{10}$) 的降水充足,并未对树木生长造成胁迫,5 月份的降水对马尾松径向生长表现为过量,体现出抑制或不相关,即冬春季节降水的增加是促进喀斯特地区树种树轮宽度增加的主要因素(图 4)。而非喀斯特的雷公山地区,未受到季风期前降水不足的生长胁迫,可能是由于高海拔地形阻挡了水汽,形成了丰富的局部地形降水。

3.2.3 树木径向生长对干旱的响应

喀斯特与非喀斯特地区逐月 PDSI 处于正常的分级范围 ($-0.49 \sim 0.49$),其中非喀斯特采样点季风期前 $p_{11} \sim c_4$ 的 PDSI 远大于其余月份,表明季风期前土壤更为潮湿,与喀斯特地区 PDSI 的变化规律不一致(图 2)。两个喀斯特地区土壤最为湿润的时期为生长季,而非喀斯特采样点为冬春季节。一方面,因为非喀斯特采样点海拔比两个喀斯特采样点的海拔高得多,冬春季节温度较低、蒸发量小;另一方面,非喀斯特地区的土壤和地形条件更有利于水分的涵养,从而保证了树木早期形成层萌发的水分供应。虽然喀斯特采样点的生长季降水量大,但水分蒸发较快,导致 PDSI 下降。相关分析和响应分析(图 4)表明,仅有两个喀斯特地区化香树的径向生长与 PDSI 的变化呈显著正相关 ($p < 0.05$),但无响应关系,即化香树的径向宽度变化与 PDSI 的变化并不同步。化香树轮宽的增長与湿润程度有一定关系,相对湿润的环境对化香树的径向生长有一定的促进作用。喀斯特地区的树木对 PDSI 没有响应,而对冬春季节的降水信号较为敏感,反映出喀斯特地区的 PDSI 变化规律与冬春季节降水变化不一致。实际上,水分渗漏加剧了喀斯特地区树木径向生长的水分胁迫,使得喀斯特地区 PDSI 代表的湿润程度对喀斯特树木的干旱胁迫指示不准确。其余树木尤其是非喀斯特地区的树木与 PDSI 的相关性较小,没有响应信号,其径向生长受到的干旱

胁迫不明显。

4 结 论

1) 相对于非喀斯特地区,喀斯特地区树木年轮包含的气候信号更多,且喀斯特地区的树种径向生长主要受到季风期前的温度和降水的限制,而非喀斯特地区树木的径向生长未受到季风期前降水不足以及温度升高的抑制。

2) 上一年12月至当年4月份的降水不足,可限制喀斯特地区针叶树和阔叶树的径向生长;上一年9月至当年4月的温度升高会导致土壤水分蒸发加快,从而加强水分胁迫,不利于喀斯特地区针叶树和阔叶树的生长。

3) 帕尔默干旱指数代表的湿润程度变化仅与

两个喀斯特地区化香树的径向生长为显著正相关($p < 0.05$)。该指标虽然表明喀斯特地区未达到干旱胁迫程度,但实际上水分渗漏加剧了喀斯特地区树木生长的水分胁迫,影响了喀斯特地区的树木生长。

4) 位于较高海拔位置的非喀斯特地区采样点的低温,导致土壤水分蒸发较少,且非喀斯特地区土壤和地形有利于水分涵养,同时,高海拔改变了季风期前的降水格局,消除了季风到来前树木生长的降水限制;高海拔非喀斯特地区针叶树的径向生长受到上一年度12月气温的控制,产生正响应信号,而阔叶树的径向生长则与温度、降水变化信号不同步,仅与上一年7月的生长季的降水以及当年8月生长季的温度有显著的正相关关系($p < 0.05$)。

参 考 文 献

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013: 1535.
- [2] Mann M E, Rutherford S, Wahl E, et al. Testing the fidelity of methods used in proxy-based reconstructions of past climate [J]. Journal of Climate, 2005, 18(20): 4097-4107.
- [3] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 265-271.
- [4] Cook E R, Peters K. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change [J]. Holocene, 1997, 7(3): 361-370.
- [5] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability [J]. Science, 2002, 295(5563): 2250-2253.
- [6] Pohl K A, Hadley K S, Arabas K B. Decoupling tree-ring signatures of climate variation, fire, and insect outbreaks in central Oregon [J]. Tree-Ring Research, 2006, 62(2): 37-50.
- [7] Way D A, Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: A review and synthesis of data [J]. Tree Physiology, 2010, 30(6): 669-688.
- [8] Vlam M, Baker P J, Bunyavechewin S, et al. Temperature and rainfall strongly drive temporal growth variation in Asian tropical forest trees [J]. Oecologia, 2014, 174(4): 1449-61.
- [9] Kirilyanov A, Hughes M, Vaganov E, et al. The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic [J]. Trees, 2003, 17(1): 61-69.
- [10] Pederson G T, Gray S T, Woodhouse C A, et al. The unusual nature of recent snowpack declines in the North American cordillera [J]. Science, 2011, 333(6040): 1-5.
- [11] Fritts H C. Tree Rings and Climate [M]. London: Academic Press, 1976.
- [12] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps [J]. Tree-Ring Bulletin, 1993, 53.
- [13] George S S. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 95: 132-150.
- [14] Michelot A, Bréda N, Damesin C, et al. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 265(1): 161-171.
- [15] Bauwe A, Koch M, Kallweit R, et al. Tree-ring growth response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) to climate and soil water availability in the lowlands of North-Eastern Germany [J]. Baltic Forestry, 2013, 19(19): 212-225.
- [16] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立 [J]. 地理学报, 1994, 49(2): 174-181.
- [17] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 阿尼玛卿山中高山林线树轮宽度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(s2): 57-63.
- [18] 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 76-85.
- [19] 刘禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 树轮降水记录及东亚夏季季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例 [J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 91-97.

- [20] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 等. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 863-870.
- [21] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2246-2253.
- [22] 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[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 61(3-4): 313-320.
- [23] Yang B, Bräuning A, Liu J J, *et al.* Temperature changes on the Tibetan Plateau during the past 600 years inferred from ice cores and tree rings[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 69(1-2): 71-78.
- [24] Zhu H F, Shao X M, Yin Z Y, *et al.* August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 305(1-4): 84-92.
- [25] Qin C, Yang B, Bräuning A, *et al.* Regional extreme climate events on the northeastern Tibetan Plateau since AD 1450 inferred from tree rings[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(3-4): 143-154.
- [26] Li Z S, Zhang Q B, Ma K. Tree-ring reconstruction of summer temperature for A.D. 1475 - 2003 in the central Hengduan Mountains, North-western Yunnan, China[J]. *Climatic Change*, 2012, 110(1): 455-467.
- [27] Chen F, Yuan Y, Wei W, *et al.* Tree-ring response of subtropical tree species in Southeast China on regional climate and sea-surface temperature variations[J]. *Trees*, 2015, 29(1): 17-24.
- [28] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q, *et al.* Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [29] Ni J, Luo D H, Xia J, *et al.* Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 799-810.
- [30] Liu L B, Wu Y Y, Hu G, *et al.* Biomass of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in central Guizhou province, southwestern China: A comprehensive inventory of a 2 ha plot[J]. *Silva Fennica*, 2016, 50(3): 1492.
- [31] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 358-367.
- [32] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43(4): 69-78.
- [33] Cook E R. A time-series analysis approach to tree-ring standardization[D]. Tucson: University of Arizona, 1985.
- [34] Cook E R, Peters K. The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1981, 41: 45-53.
- [35] Hancock P A, Hutchinson M F. Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21(12): 1684-1694.
- [36] Farr T G, Rosen P A, Caro E, *et al.* The shuttle radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 1-33.
- [37] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies[J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [38] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [39] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*[M]. Dordrecht: Springer, 1990.
- [40] 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[J]. 气象学报, 2000, 58(2): 223-233.
- [41] Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the Average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. *Journal of Climatology and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [42] Friedrichs D A, Trouet V, Büntgen U, *et al.* Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany[J]. *Trees*, 2009, 23(4): 729-739.
- [43] 王婷, 于丹, 李江风, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [44] Oberhuber W, Stumböck M, Kofler W. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness[J]. *Trees*, 1998, 13(1): 19-27.
- [45] Borgaonkar H, Pant G, Rupa K K. Tree-ring chronologies from Western Himalaya and their dendroclimatic potential[J]. *IAWA Journal*, 1999, 20(3): 295-309.

Tree-rings of Dominant Species in Karst Forests in Southwestern China and Their Responses to Climate Change

XU Haiyang^{1,2,3}, LIULibin^{1,2,3}, GUO Yinming^{1,2,3}, LIANG Hui⁴, NI Jian^{1,3,5}

(1.State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding Guizhou 562100, China; 4. Libo Forestry Administration, Libo 558400, China; 5.College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang 321004, China)

Abstract: Tree-ring data of six dominant tree species (*Platycarya strobilacea* is the repeated tree species) of two typical karst areas and a non-karst area in Guizhou Province, China were used to develop six tree-ring chronologies. The different and similar responses of radial growth to climate change during the past five decades of different tree species of different areas were investigated, and the effects of climate factors to the six tree species were also discussed. Results show that the water-heat condition before the monsoon season is the main climate limitation for the radial growth of both coniferous and broad-leaved trees in karst forests. The reduction of monthly mean precipitation and the rise of monthly mean temperature before the monsoon season lead to faster evaporation of soil moisture before the monsoon, thus, water stress is enhanced, resulting in drought stress on the radial growth of both coniferous and broad-leaved trees in karst forests. The Palmer drought severity index (PDSI) indicates weak restrictions on most of the tree growth, but in fact, water leakage aggravates the water stress for the growth of coniferous and broad-leaved trees in the karst areas. Precipitation is not the limitation for trees growing in the non-karst area, because lower temperature at higher elevation of sampling point in the non-karst area reduces the evaporation of soil moisture from last winter to next spring. The soil and land form in non-karst area is crucial for water reservation, meanwhile, high elevation also changes the precipitation patterns before the monsoon, which eliminates the water restriction of soil moisture for the growth of trees before the monsoon. The low temperature in previous December is the main limitation for the radial growth of coniferous trees with a positive response signal, and broad-leaved trees are slightly promoted by temperature and precipitation in growing season.

Key words: karst forest; tree-ring; monsoon; climate response