

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160184

普达措国家公园海拔上限3个针叶树种径向生长对气候变化的响应

余佳霖^{1,2} 张卫国¹ 田 昆¹ 松卫红³ 李秋平³ 杨 荣³ 张 贇¹

(1 西南林业大学国家高原湿地研究中心 2 西南林业大学环境科学与工程学院

3 云南碧塔海省级自然保护区管理)

摘要:本文利用树木年轮学方法研究普达措国家公园海拔上限麦吊云杉、大果红杉和长苞冷杉的生长特征,构建差值年表并分析其与气候因子的关系,以揭示影响该区域3个主要树种径向生长的气候因子及对气候变化响应的种间差异。结果表明:1)生长后期的气候因子对该地区树木生长起着重要作用,但不同树种的响应方式存在差异;2)麦吊云杉生长主要受限于生长季的气候条件,与上年生长后期(上年9—10月)平均温度呈显著负相关,且当年生长盛期(6—8月)温度的升高有利于其径向生长;3)大果红杉生长主要受限于生长后期的水分条件,主要表现为与上年10月以及上年生长后期(9—10月)降水呈显著负相关;4)长苞冷杉生长主要受限于生长季的气候条件,主要表现为对当年生长季盛期(6—8月)以及当年生长季后期(9—10月)平均温度的显著正相关。本研究为香格里拉地区的气候重建提供基础数据。

关键词:树木年轮; 气候响应; 海拔分布上限; 普达措国家公园

中图分类号: S716.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2017)01-0043-09

YU Jia-lin^{1,2}; ZHANG Wei-guo¹; TIAN Kun¹; SONG Wei-hong³; LI Qiu-ping³; YANG Rong³; ZHANG Yun¹. **Response of radial growth of three conifer trees to climate change at their upper distribution limits in Potatso National Park, Shangri-La, southwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017) **39**(1) 43-51 [Ch, 38 ref.]

1 National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan, 650224, P. R. China;

2 College of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan, 650224, P. R. China;

3 Administration of Bitahai Provincial Reserve, Shangri-La, Yunnan, 674499, P. R. China.

In order to detect the response of tree growth to climate change in the northwestern Yunnan Plateau, we used residual chronologies of three major conifers, i. e. *Picea brachytyla*, *Larix potaninii* and *Abies georgei* at their upper distribution limits in Potatso National Park, to study the characteristics of the residual chronologies and the relationships between radial growth and climatic factors (temperature and precipitation). We aimed to find out the main climatic factors affecting tree growth in the area and to detect differences of growth responses to climates among the studied species. The results showed that: 1) The climatic factors (temperature and precipitation) of post growing season were the main factors affecting tree growth at the upper distribution limits in Potatso National Park, but varied with tree species. 2) The radial growth of *P. brachytyla* was mainly limited by temperature condition during the post growing season (September–October of previous year), and was negatively correlated with mean

收稿日期: 2016-06-02 修回日期: 2016-09-20

基金项目: 云南省教育厅重点基金项目(2015Z136)、西南林业大学科研启动基金项目(111428)、云南省高原湿地科学创新团队(2012HC007)。

第一作者: 余佳霖。主要研究方向: 树木年轮与气候变化。Email: 18669035075@yeah.net 地址: 650224 云南省昆明市盘龙区白龙寺300号西南林业大学国家高原湿地研究中心。

责任作者: 张贇, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 基于生物多样性研究的固定样地监测、群落的空间分布格局、气候变化对树木生长的影响以及林线动态特征分析。Email: zhangyuncool@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

temperature of post growing season in previous year (September–October of previous year), meanwhile higher temperature during the growing season (June–August) of current year positively affected its radial growth. 3) Precipitation in October and the post growing season of previous year (September–October) was the main factor limiting the radial growth of *L. potaninii*, with a significant and negative correlation between the residual chronology and precipitation. 4) The radial growth of *A. georgei* was mainly limited by climatic factors of the growing season, presented by a significant and positive correlation between radial growth and mean temperature of growing season (June–August) and post growing season (September–October) in current year. This study can provide basic data for climate reconstruction in Shangri-La, northwestern Yunnan of southwestern China.

Key words tree ring; climatic response; upper distribution limits; Potatso National Park

全球气候变暖已对森林生态系统产生深远影响^[1]。树木径向生长除了受自身遗传因素影响外,也受环境变化(尤其是气候变化)的影响^[2]。温度和降水是影响树木径向生长的重要环境因子,温度和降水的变化导致树木生理代谢过程发生变化,从而影响树木的生殖策略和生长过程^[3]。树木年轮的宽窄变化能够反映出历史气候的变化,是很好的研究过去气候情况的代用资料^[2],通过年轮宽度指数与气候因子的相关性分析,可以揭示影响某个区域树木生长的关键气候因子,进而开展气候重建工作^[4]。因此,树木年轮学成为全球气候变化研究中获取过去气候环境数据的重要方法之一^[5]。

海拔上限树木生长对气候变化极为敏感,受到广泛关注^[6]。普遍认为海拔上限的树木对温度敏感^[7],例如阿尼玛卿山中高部的祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)主要对7月平均温度呈显著相关^[8],以及四川省松潘县境内的岷江冷杉(*Abies faxoniana*)对温度表现出显著相关而降水并不显著^[9]。也有研究表明海拔上限树木生长受降水而非温度影响^[10],例如祁连山东段龙岭森林上限的青海云杉(*Picea crassifolia*)仅表现出了与降水的显著相关^[11]。或既受温度也受降水影响^[10,12],例如长白山林线处的鱼鳞云杉(*P. jezoensis*)与岳桦(*Betula ermanii*)都对温度和降水都表现出了显著相关性。以及对温度和降水都不敏感的现象^[13],例如曹宗英等^[14]在对祁连山中上部海拔上限的青海云杉的研究中,发现其对温度和降水的响应都不显著。因而海拔上限树木生长对气候因子的响应具有敏感性、不确定性和复杂性,其响应机制有待进一步研究。

滇西北高原位于青藏高原东南缘,是横断山脉的核心区域,是印度季风湿润气团进入青藏高原的水汽通道^[15],属于气候变化敏感区,是树木年轮学研究的理想场所之一^[16]。已有学者对滇西北高原白马雪山海拔上限的长苞冷杉(*Abies georgei*)和梅里雪山海拔上限的麦吊云杉(*Picea brachytyla*)进行

树木年轮学的研究^[17-18],结果发现温度和降水都是限制该区域海拔上限树木生长的主要因子,但不同树种树木径向生长对气候变化的响应存在种间和区域差异。此外,还利用年轮密度资料重建了该区域的夏季温度^[19]。由于树木径向生长对气候变化的响应存在种间差异,单个树种年轮学的研究并不能满足区域气候变化研究的需要。因而海拔上限不同树种径向生长对气候变化响应的研究,能够更加全面揭示影响区域树木生长的关键气候因子,对预测气候变化背景下的树木生长具有先导意义。

本文以滇西北香格里拉市普达措国家公园为研究区域,选取区域内主要针叶树种麦吊云杉、大果红杉(*Larix potaninii*)和长苞冷杉为研究对象,运用树木年轮学的方法研究3个树种的年表特征,采用响应函数分析年轮宽度指数与温度和降水的相关关系,以及这种相关关系近50年来的稳定性。旨在揭示影响该区域树木生长的关键气候因子,探讨不同树种径向生长对气候变化的响应差异,从而为气候变化背景下的森林管理与保护提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究位于滇西北香格里拉市普达措国家公园(26°20′08″~27°40′31″N,99°10′22″~100°03′17″E),地处青藏高原东南缘横断山脉的中西部,是我国大陆第一个国家公园,也是滇西北最重要的生态区域,拥有目前云南省保护最完整和最具原始性的云、冷杉林区^[20]。群落多样性随海拔梯度变化明显,从低海拔到高海拔依次为以高山松(*Pinus densata*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)为主的暖性、温凉性针叶林(海拔2 390~3 200 m);以麦吊云杉为主的寒温性针叶林(海拔3 200~3 700 m);以苍山冷杉(*Abies delavayi*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)和大果红杉等为主的寒温性针叶林(海拔3 400~4 000 m);以长苞冷杉及高山灌丛草甸植被为主的

植被类型(海拔3 700~4 159 m)^[21]。

麦吊云杉为喜光、浅根性树种,稍耐荫,在气候温凉、湿润、土层深厚、排水良好的酸性黄壤或山地棕色森林土带生长良好。大果红杉喜光照,适应性强,耐干旱气候及土壤瘠薄的环境,在气候温凉或干旱、棕色森林土火山地草甸森林土地带生长良好。长苞冷杉耐荫,在气候湿冷、干湿季节明显、具腐殖质酸性灰化土壤的高山地带生长良好。

研究区属于亚热带季风气候,四季分明。根据香格里拉气象站1960—2011年的气候数据,年平均温度为5.9℃,最冷月1月,平均温度为-3.0℃,最热月7月,平均温度为13.6℃;降水较为丰沛,年平均降水量600 mm左右,但分配时间不均匀,主要集中在6—9月,占全年降水量的73%(图1a)。近50年来,香格里拉年均温上升趋势明显(图1b),年降水量有增多的趋势,但不显著(图1c)。

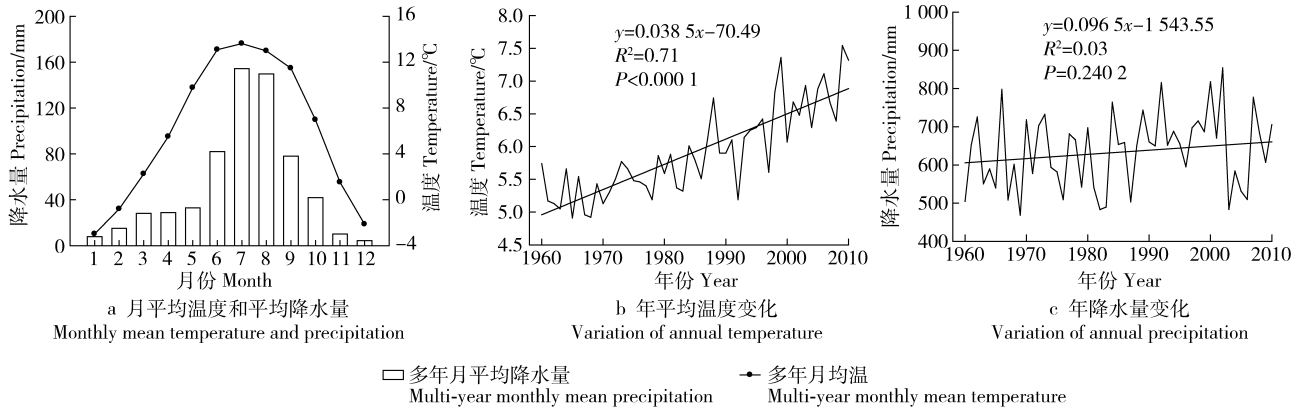


图1 香格里拉气象站1960—2011年气象资料

Fig. 1 Climate data from the Shangri-La meteorological station(1960–2011)

1.2 样本采集与年表建立

2015年8月和11月进行了样本的采集工作。基于国际树木年轮数据库(International tree-ring data bank, ITRDB)标准^[22],在研究区海拔3 700 m左右,选取保存完好的天然林(大果红杉与麦吊云杉的混交林)在同一采样点采集大果红杉和麦吊云杉,在海拔3 900 m左右长苞冷杉纯林采集长苞冷

杉样芯,两个采样点采样区域的海拔高差分别控制在10 m以内。用内径为5.15 mm的生长锥在胸高处(距地1.3 m)钻取树芯样本,确保取到髓心。每棵树取2—3个样芯,将取到的样芯放入塑料吸管内,并进行编号。最终,3个树种共采集了42棵树,共86个样芯(表1)。

表1 树木年轮采样点概况

Tab. 1 Description of the sampling sites

树种 Tree species	纬度 Latitude	经度 Longitude	样本量(树/样芯) Sample number(tree/radii)	海拔 Elevation/m
麦吊云杉 <i>Picea brachytyla</i>	27°47'56"N	99°59'50"E	14/28	3 786
大果红杉 <i>Larix potaninii</i>	27°04'56"N	99°59'50"E	13/26	3 786
长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	27°47'10"N	100°00'12"E	15/32	3 954

将所采取的样芯带回实验室干燥、固定、打磨,对打磨好的样芯进行交叉定年^[23],然后用年轮宽度测量软件 CDendro and CooRecorder ver. 7.3^[24]量测年轮宽度,最后用 COFECHA 程序^[25]对测量结果进行检验,在剔除由于腐朽和破碎等原因与主序列相关性较低的序列后,最终保留40棵树,78个样芯(表2)用于年表的建立。用 ARSTAN 程序^[26]采取相对保守的负指数函数进行除趋势和标准化分析,最终建立基于麦吊云杉、大果红杉和长苞冷杉树轮宽度的标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。由于差值年表具有高质量的高频信

息^[7],因此,本文选择差值年表与气候因子进行相关性分析(图2)。

1.3 气象资料

本文气候数据来源于采样点附近香格里拉气象站(99°42'E,27°50'N,海拔3 276.7 m,中国气象科学数据共享服务网:<http://cdc.cma.gov.cn>)。采用了 Mann-Kendall^[27]法对气象数据进行检验。经检验表明,该气象数据可靠,温度和降水数据资料变化相对均一,适合用于气候的相关分析。1960—2011年间的平均温度和降水两个气候指标用于与年表的相关性分析。

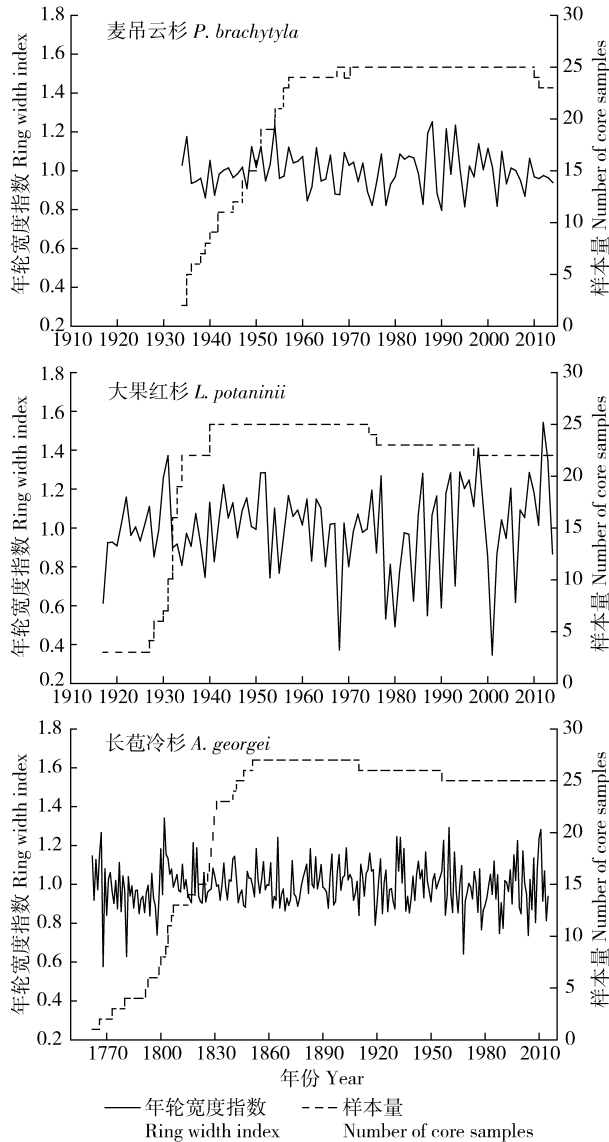


图2 树轮宽度差值年表(实线)和样本量(虚线)

Fig.2 Residual tree-ring chronology (solid line) and sample size (dotted line)

1.4 数据处理

由于气候因子对树木生长的影响具有一定的滞后性^[28],因此选取了上年7月至当年10月的月均温度和月降水量以及上年生长后期(上年9—10月)、当年生长初期(4—5月)、当年生长盛期(6—8月)以及当年生长后期(9—10月)的平均温度与总降水量,与3个树种公共区间的年轮指数进行相关分析。生长季划分标准参考研究区域树木生理活动5℃的起始月份(4—10月,图1a)以及前人在重建滇西北部分地区夏季温度时将树木的生长暖季划分为当年4—9月^[17]。使用Dendroclim2002^[24]软件分析年表与气候因子之间的相关系数,利用其中的moveforward、backward和moving interval 3个方式分析年轮宽度与气候因子之间相关系数的动态变化,使用SigmaPlot软件制作相关图形。

2 结果与分析

2.1 年表特征

3个树种差值年表的样本总体代表性均大于0.85,说明3个年表都能较好地代表研究区内麦吊云杉、大果红杉和长苞冷杉树轮宽度变化的基本特征,适合于树木年轮学的研究。大果红杉的平均敏感度高于麦吊云杉和长苞冷杉,说明大果红杉年轮的宽窄变化较大。麦吊云杉与大果红杉的树与树间平均相关系数、信噪比及第一特征向量百分比均高于长苞冷杉,说明麦吊云杉和大果红杉的年表序列含有更多的气候变化信息。

2.2 径向生长与气候因子的响应

麦吊云杉差值年表与月气候因子的相关分析表明,麦吊云杉径向生长主要受到温度的影响,与上年

表2 普达措国家公园3个树种差值年表的统计信息

Tab.2 Statistics characteristics of the three studied species chronologies in Pudacuo National Park

年表 Residual chronologies	麦吊云杉 <i>P. brachytyla</i>	大果红杉 <i>L. potaninii</i>	长苞冷杉 <i>A. georgei</i>
样本量(树/样芯) Sample number(tree/radii)	14/26	13/25	13/27
序列长度(年份) Length of series(year)	1933—2014	1914—2014	1761—2015
平均敏感度 Mean sensitivity	0.121	0.263	0.131
标准差 Standard deviation	0.103	0.221	0.115
公共区间(年份) Common interval time span(year)	1959—2010	1942—2014	1853—2015
树与树间平均相关系数 Mean correlation between trees*	0.450	0.463	0.332
信噪比 Signal-to-noise ratio*	18.853	18.987	12.417
样本总体代表性 Expressed population signal*	0.950	0.950	0.925
第一特征向量百分比 Variance in first eigen vector/%*	48.29	49.74	36.20

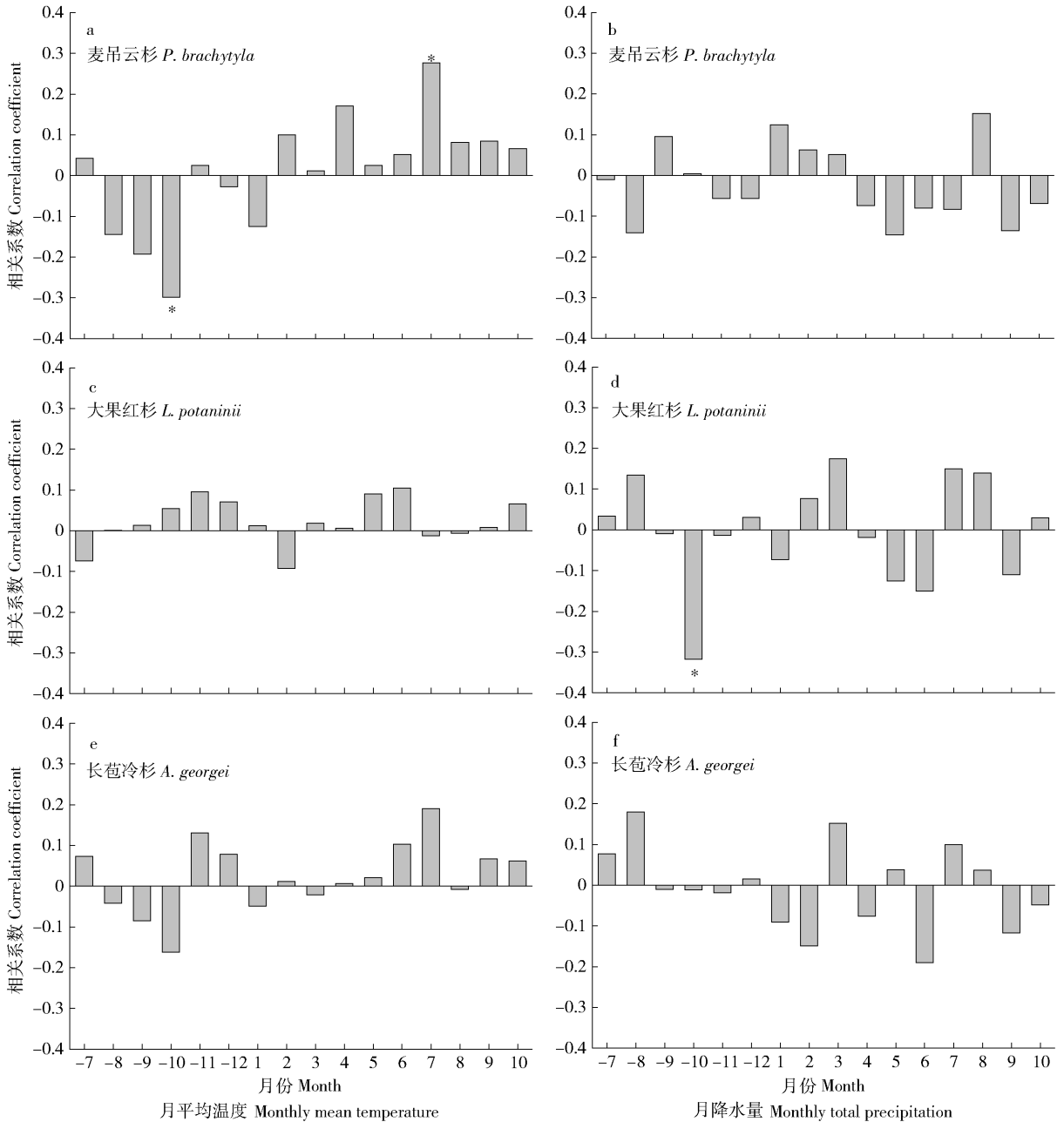
注:*表示共同公共区间统计量。Note:* means data belong to statistics of common interval.

10 月的平均温度呈显著负相关 ($P < 0.05$) (图 3a), 与当年 7 月的平均温度呈显著正相关 ($P < 0.05$) (图 3a), 与降水未达到显著相关水平 (图 3b)。麦吊云杉径向生长与生长季气候因子相关性较好 (表 3), 其中与上年生长后期 (上年 9—10 月) 的平均温度达到显著负相关, 与当年生长盛期 (6—8 月) 的平均温度达到显著正相关, 与当年生长初期 (4—5 月) 的降水达到显著负相关。

大果红杉径向生长与月平均温度均未达到显著相

关水平 (图 3c), 而与上年 10 月的降水呈显著负相关 (图 3d)。与生长季气候因子的相关分析表明 (表 3), 大果红杉径向生长与上年生长后期的降水达到显著负相关, 而与生长季的平均温度均未达到显著相关。

长苞冷杉径向生长与月平均温度和降水均未达到显著相关 (图 3e、f)。而与季节性气候因子的相关分析表明 (表 3), 长苞冷杉径向生长与当年生长盛期和当年生长后期的平均温度呈显著正相关, 与降水未达到显著相关。



* 表示在 0.05 水平上显著相关。- 表示上年, 例如 -11 指上年 11 月份。* indicates significant correlation at $P < 0.05$ level. - stands for the previous year, for instance, -11 means November of previous year.

图 3 3 个树种差值年表与 1960—2010 年间逐月气候因子 (月平均温度和月降水量) 的响应函数分析

Fig. 3 Response function analysis between residual chronologies of the three studied species and monthly climate factors (monthly mean temperature and monthly total precipitation) during the period of 1960–2010

表 3 树轮宽度差值年表与生长季气候因子的相关分析

Tab. 3 Correlation analyses between the residual chronologies and the climatic factors in growing season

生长季 Growing season	平均温度 Mean temperature			降水量 Precipitation		
	麦吊云杉	大果红杉	长苞冷杉	麦吊云杉	大果红杉	长苞冷杉
	<i>P. brachytyla</i>	<i>L. potaninii</i>	<i>A. georgei</i>	<i>P. brachytyla</i>	<i>L. potaninii</i>	<i>A. georgei</i>
上年生长后期(上年9—10月) Post growing season of previous year (September to October of previous year)	-0.476 *	0.084	-0.211	0.059	-0.248 *	-0.062
当年生长初期(当年4—5月) Early growing season of current year (April to May of current year)	0.110	0.092	0.065	-0.223 *	-0.066	-0.031
当年生长盛期(当年6—8月) Growing season of current year (June to August of current year)	0.278 *	0.081	0.216 *	-0.032	0.025	0.011
当年生长后期(当年9—10月) Post growing season of current year (September to October of current year)	0.181	0.089	0.186 *	-0.153	-0.149	-0.099

注: * 表示在0.05水平上显著相关。Note: * indicates significant correlation at $P < 0.05$ level.

2.3 径向生长与气候因子的动态关系

通过滑动分析来检验树木生长与气候因子的动态关系,结果表明(表4),3个树种的滑动分析与响应分析结果一致,表明树木生长与气候关系在时间尺度上较为稳定。麦吊云杉的年轮宽度与上年生长后期及当年生长盛期的平均温度在1961—2010年期间分别呈现稳定的显著负相关与正相关,与上年10月平均温度在1962—1978年,1980年以及1992—2010年期间呈现出稳定的显著负相关关系,

而与当年7月平均温度在1962—1976年,1979年以及1992—2010年期间呈现出稳定的显著正相关;大果红杉年轮宽度在1962—1981年以及1992—2011年期间与上年10月降水量呈现出稳定的显著负相关,与上年生长后期降水在多个时间段表现出显著相关关系;长苞冷杉年轮宽度与当年生长盛期平均温度在1966—1979年后相关性减弱,与当年生长后期的平均温度在多个短时间段达到显著相关,整体稳定性较差。

表4 树轮宽度差与气候因子的滑动分析

Tab. 4 Moving correlation analyses between the residual chronologies and the climatic factors

气候因子 Climatic factors	麦吊云杉 <i>P. brachytyla</i>		大果红杉 <i>L. potaninii</i>			长苞冷杉 <i>A. georgei</i>	
	上年10月平均温度 Mean	当年7月平均温度 Mean	上年生长后期平均温度 Mean	当年生长盛期平均温度 Mean	当年生长初期降水量 Precipitation	上年10月降水量 Precipitation	上年生长后期降水量 Precipitation
	temperature of previous October	temperature of current July	temperature of previous post growing season	temperature of current growing season	of current early growing season	of previous October	of previous post growing season
显著年份 Significant year	1962—1978(-), 1962—1976(+), 1961—2010(-), 1980(-), 1979(+), 1992—2010(-)	1961—2010(+)	1966—1974(-), 1962—1981(-), 1961(-), 1980—1981(-), 1992—2011(-), 1983(-), 1995—1997(-), 2002(-)	1966—1979(+), 1966—1968(+), 1976—1978(+), 1987(+), 1998(+), 2005—2006(+)	1969—1984(-), 1987(+), 1987(-), 1990(-), 1992—1997(-), 2001—2005(-), 2010—2011(-)	1987(+), 1998(+), 1980(+), 1989—1990(+), 2000(+), 2004(+)	

注: (-) 表示相关关系为负, (+) 表示相关关系为正。Notes: (-) indicates negative correlation, (+) indicates positive correlation.

3 讨论与结论

普达措3个树种海拔上限径向生长对气候变化的响应模式不同,麦吊云杉和长苞冷杉的径向生长主要受温度影响,大果红杉则主要受降水影响,上年生长后期和当年生长盛期的气候因子(温度或降水)对该地区树木生长起着重要作用。3个树种对气候的响应差异体现了树种生物学特性和生理响应过程的不同。

3.1 各树种径向生长对气候因子的响应差异

3个树种径向生长与气候因子均表现出了显著相关性,但响应的因子(温度或降水)或关系(正或负)不同(图3、表3)。上年生长后期(上年9—10月)以及上年10月平均温度的升高不利于麦吊云杉的径向生长,生长季末温度的升高,使得树木的呼吸作用和代谢作用加强,植物体内所储存的以供次年生长所需的营养物质的消耗加速,从而抑制了来年树木的生长^[17]。上年10月的降水量与大果红杉径向生长的显著负相关,可能是因为降水通常伴随

冷空气入侵、云量增多和太阳辐射的减少,导致温度降低,使得用于来年生长的碳水化合物生产减少,从而对树木生长起到限制作用^[29]。长苞冷杉径向生长与当年生长后期(9—10月)的平均温度表现为显著正相关,生长后期形成层还没有完全停止活动,树木依然在缓慢生长,因而温度升高能够促进树木的径向生长^[30]。这与相邻地区川西米亚罗林区岷江冷杉的研究结果相类似^[31]。

另外,麦吊云杉与当年生长初期降水量呈显著的负相关,可能是因为生长初期大量的降水导致林中大量积水,造成树木根部的无氧呼吸,消耗过多的光合产物,进而抑制麦吊云杉的径向生长^[12]。麦吊云杉和长苞冷杉径向生长与当年生长盛期(6—8月)的平均温度呈显著正相关,是因为生长盛期树木形成层活动最为活跃,温度的升高有利于光合作用效率的提高,产生更多的有机物,从而有利于形成宽轮,结果与郭明明等^[32]对川西米亚罗林区高海拔处紫果云杉的研究结果一致。大果红杉没有表现出类似的响应,说明生长盛期的气候因子不是限制该树种生长的主要影响因子,其机理有待进一步研究。

许多研究表明,海拔上限树木的生长主要受温度影响^[33],本文研究的3个树种中有两个树种(麦吊云杉和长苞冷杉)表现出了相同的响应机制。海拔高度通过影响水热分配,影响树木的径向生长,海拔上限的树木处在生理活动极限区,更容易受到低温的限制^[34]。海拔上限大果红杉的生长则受降水限制,除了和传统观点不一致外,也与其他高海拔地区落叶松属的研究结果有所偏差。孙毓等人研究发现四川乡城小雪山垭口的大果红杉对5月的温度呈显著正相关,而与降水没有显著相关^[35];陈力等人对长白山长白落叶松的研究中也发现,高海拔长白落叶松主要受温度的影响,而并未受降水影响^[33]。本文研究结果表明大果红杉对降水的响应是与温度关系的一种间接体现,上年生长季末(10月)降水的增多,意味着云量大、光照弱、太阳辐射低,温度也相对较低,不利于光合作用形成碳水化合物用于来年的生长,喜光的大果红杉对上述环境变化较为敏感,因而表现出了显著负相关关系。

3.2 径向生长与气候因子的稳定性分析

3个树种对气候因子稳定性表现不同(表4),麦吊云杉与上年生长后期与当年生长盛期的温度在1962—2010年间相关关系达到了稳定状态,而与当年生长季初期的降水相关性并不是很稳定,说明上年生长后期与当年生长盛期的温度是影响麦吊云杉径向生长的主要气候因子;从大果红杉与上年生长后期与上年10月降水量的稳定关系可以看出,上年

生长后期的降水量是影响大果红杉生长的主要气候因子;长苞冷杉与当年生长盛期以及当年生长后期的平均温度与年轮宽度的相关性不是很稳定,但从一定程度上反映出当年生长盛期与后期的温度对长苞冷杉的影响。

3.3 气候变暖对普达措国家公园海拔上限主要树种径向生长的影响

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)估计,在4种典型温室气体情景(即RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)下2081—2100年全球平均温度相较于1989—2005年,可能存在0.3~1.7℃, 1.1~2.6℃, 1.4~3.1℃和2.6~4.8℃范围的增温^[36]。同时,在PRECIS模型SRES B2情景下,中国的西南地区2071—2100年的平均温度相比于1961—1990年也会上升2.9℃^[37]。麦吊云杉与当年生长盛期以及当年7月的平均温度呈显著正相关,而与上年生长后期以及上年10月的平均温度呈显著负相关,其综合作用非常复杂,因此,准确的气候预测以及响应差异的机理研究显得更为迫切。相对于麦吊云杉,长苞冷杉与气候因子的相关关系较为简单,表现出与当年生长盛期以及当年生长后期平均温度的显著正相关,因此,未来温度的升高也将有利于长苞冷杉的生长。而大果红杉并未与温度达到显著相关,因此,未来温度的升高对大果红杉的影响有待进一步研究。

在气候变化的背景下,西南地区依旧是中国西部乃至全国降水较多的地区之一,预计到2050年,西南地区将会是最大降水区,降水增加将超过200mm^[38]。普达措国家公园海拔上限的大果红杉对上年生长后期以及上年10月的降水表现出显著的负相关,未来降水的增多将会抑制大果红杉的径向生长。对于麦吊云杉,与当年生长初期降水量表现出显著负相关,未来降水的增多很有可能会抑制麦吊云杉的生长,但温度升高对麦吊云杉生长的影响较为复杂,温度和降水的综合作用使未来气候变化对麦吊云杉的生长难以预测。综合来看,未来温度和降水的变化趋势有利于长苞冷杉的生长,抑制大果红杉的生长,而麦吊云杉的生长预测较为复杂。但随着全球气候变化中极端气候事件的频现,需要考虑极端气候引起的病虫害、火灾和风灾等干扰事件的影响,这些事件将不利于耐荫树种麦吊云杉和长苞冷杉的生长,但有利于阳性树种大果红杉的更新和生长,从而在一定程度上抵消降水的副作用。

参 考 文 献

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.

- QIN D H. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7):874-883.
- [2] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京:气象出版社,1990:44-65.
- WU X D. Tree ring and climate change [D]. Beijing: Meteorological Publishing House, 1990: 44-65.
- [3] FRITTS H C. Tree rings and climate[M]. London: Academic Press, 1976:270.
- [4] LUCKMAN B H, BRIFFA K R, JONES P D, et al. Tree-ring based reconstruction of summer temperature at the Columbia Icefield, Alberta, Canada, AD 1073-1983[J]. *Holocene*,1997, 7(4):375-389.
- [5] 彭剑峰,勾晓华,陈发虎,等. 坡向对海拔梯度上祁连圆柏树木生长的影响[J]. *植物生态学报*,2010,34(5):517-525.
- PENG J F, GOU X H, CHEN F H, et al. Influences of slope aspect on the growth of *Sabina przewalskii* along an elevation gradient in China's Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010,34(5):517-525.
- [6] 刘娟,邓徐,吕利新. 西藏八宿川西云杉树线过渡区树木生长与气候关系的一致性[J]. *植物生态学报*,2015,39(5):442-452.
- LIU J, DENG X, LÜ L X. Relationship of tree growth and climatic factors at treeline of *Picea likiangensis* var. *balfouriana* forest in Basu County, Xizang [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2015,39(5):442-452.
- [7] 张文涛,江源,王明昌,等. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. *生态学报*,2015,35(19):6481-6488.
- ZHANG W T, JIANG Y, WANG M C, et al. Responses of radial growth in *Larix principis-rupprechtii* to climate change along an elevation gradient on the southern slope of Luya Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(19):6481-6488.
- [8] 彭剑峰,勾晓华,陈发虎,等. 阿尼玛卿山中部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(增刊2):57-62.
- PENG J F, GOU X H, CHEN F H, et al. Climatic response of tree-ring width from alpine treeline in the middle of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*,2006,28(Suppl. 2):57-62.
- [9] 李金健,邵雪梅,李媛媛,等. 树轮宽度记录的松潘地区年平均气温变化[J]. *科学通报*,2014,59(15):1446-1458.
- LI J J, SHAO X M, LI Y Y, et al. Annual temperature recorded in tree-ring from Songpan Region (in Chinese) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014,59(15):1446-1458.
- [10] 王小明,赵秀海,高露双,等. 长白山北坡沿海拔梯度岳桦径向生长对气候的响应[J]. *应用与环境生物学报*,2013,19(6):929-934.
- WANG X M, ZHAO X H, GAO L S, et al. Climatic response of *Betula ermanii* tree-ring growth along an altitudinal gradient on the northern slope of the Changbai Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Environment Biology*,2013,19(6):929-934.
- [11] 侯迎,王乃昂,张学敏,等. 基于树轮资料重建祁连山东段冷龙岭1848年以来的干湿变化[J]. *山地学报*,2011,29(1):12-18.
- HOU Y, WANG N A, ZHENG X M, et al. Precipitation reconstruction from tree ring width over the eastern part of the Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011,29(1):12-18.
- [12] 高露双,王小明,赵秀海. 长白山过渡带红松和鱼鳞云杉径向生长对气候因子的响应[J]. *植物生态学报*,2011,35(1):27-34.
- GAO L S, WANG X M, ZHAO X H. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(1):27-34.
- [13] 赵志江,谭留夷,康东伟,等. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*,2012,23(3):603-609.
- ZHAO Z J, TAN L Y, KANG D W, et al. Responses of *Picea likiangensis* radial growth to climate change in the Small Zhongdian Area of Yunnan Province, southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3):603-609.
- [14] 曹宗英,勾晓华,刘文火,等. 祁连山中部青海云杉上下限树轮宽度年表对气候的响应差异[J]. *干旱区资源与环境*,2014,28(7):29-34.
- CAO Z Y, GOU X H, LIU W H, et al. Response of tree-ring to the climate factors at upper and lower elevation in the middle region of Qilian Mountains [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2014,28(7):29-34.
- [15] 杨家伟. 滇西北地区生物多样性保护现状与对策[J]. *林业资源管理*,2002(3):61-65.
- YANG J W. Status and solutions of biodiversity protection in northwest Yunnan [J]. *Forest Resources Management*,2002(3):61-65.
- [16] 张劲峰,周鸿,耿云芬. 滇西北亚高山退化森林生态系统及其恢复途径:“近自然林业”理论及方法[J]. *林业资源管理*, 2005(5):33-37.
- ZHANG J F, ZHOU H, GENG Y F. Restoration approach of sub-alpine degraded ecosystem in northwest Yunnan: “close to nature forestry” theory and methods [J]. *Forest Resources Management*, 2005(5):33-37.
- [17] FAN Z X, BRAUNING A, CAO K F, et al. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009,258(3):306-313.
- [18] FAN Z X, THOMAS A. Spatiotemporal variability of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in Yunnan Province, SW China, 1961-2004 [J]. *Climatic Change*, 2013, 116(2):309-325.
- [19] FAN Z X, BRAUNING A, YANG B, et al. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China [J]. *Global and Planetary Change*, 2009,65:1-11.
- [20] 曾凤琴. 普达措国家公园高原湿地保护与利用[J]. *科技信息*, 2008(16):535-550.
- ZENG F Q. With the use of the national park Pudacuo Plateau wetland [J]. *Science & Technology Information*,2008(16):535-

- 550.
- [21] 张燕妮, 张志明, 耿宇鹏, 等. 滇西北地区优先保护的植物群落类型[J]. 生物多样性, 2013, 21(3): 296-305.
ZHANG Y N, ZHANG Z M, GENG Y P, et al. Priority plant communities for conservation in Northwest Yunnan [J]. Biodiversity Science, 2013, 21(3): 296-305.
- [22] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 凉水自然保护区不同皮型红松径向生长对气候的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2511-2520.
LIU M, MAO Z J, LI Y, et al. Climatic effects on radial growth of Korean pines with different bark forms in Liangshui Natural Reserve, northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(9): 2511-2520.
- [23] STOKES M A, SMILEY T L. An introduction to tree-ring dating [D]. Tucson: The University of Arizona Press, 1996.
- [24] 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.
- [25] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43(1): 69-78.
- [26] COOK E R, HOLMES R L. Users manual for program ARSTAN. Tucson: Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986.
- [27] KENDALL M G, GIBBONS J D. Rank correlation methods [D]. London: Edward Arnold, 1990.
- [28] 徐金梅, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 祁连山青海云杉径向生长对气候的响应[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 1-6.
XU J M, BAO F C, LÜ J X, et al. Climate response of radial growth of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 1-6.
- [29] 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.
SHANG H M, WEI W S, YUAN Y J, et al. Response of tree ring width to recent climate change, south slope of Alta Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2246-2253.
- [30] 谭留夷, 赵志江, 康东伟, 等. 王朗自然保护区紫果云杉径向生长与气候因子的关系[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 29-34.
TAN L Y, ZHAO Z J, KANG D W, et al. A study on the relationship between the radial growth of *Picea purpurea* and the climatic factors in Wanglang National Nature Reserve [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2011, 29(1): 29-34.
- [31] 徐宁, 王晓春, 张远东, 等. 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3742-3751.
XU N, WANG X C, ZHANG Y D, et al. Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3742-3751.
- [32] 郭明明, 张远东, 王晓春, 等. 川西米亚罗林区主要树木生长对气候响应的差异[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2237-2243.
GUO M M, ZHANG Y D, WANG X C, et al. Difference in responses of major tree species growth to climate in the Miyaluo Mountains, western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2237-2243.
- [33] 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 等. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1568-1574.
CHEN L, YIN Y H, ZHAO D S, et al. Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1568-1574.
- [34] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 等. 芦芽山华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 树轮宽度年表对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2016, 6(6): 1608-1618.
LI Y J, WANG S Y, NIU J J, et al. Climate-radial growth relationship of *Larix principis-rupprechtii* at different altitudes on Luya Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 6(6): 1608-1618.
- [35] 孙毓, 王丽丽, 陈津, 等. 中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球学, 2010, 40(5): 645-653.
SUN Y, WANG L L, CHEN J, et al. Growth characteristics and response to climate change of Chinese larch [J]. Science China Press, 2010, 40(5): 645-653.
- [36] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [37] XU Y L, HUANG X Y, ZHANG Y, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century [J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(Suppl. 1): 50-53.
- [38] 刘桂芳, 卢鹤立. 全球变暖背景下的中国西部地区气候变化研究进展[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(4): 69-73.
LIU G F, LU H L. Research progress of climatic change in western China on the background of global warming [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(4): 69-73.

(责任编辑 范娟
责任编辑 赵秀海)