



## 莽山不同海拔华南五针松径向生长对气候因子的响应

黄蕴凯, 沈燕, 王旭, 周光益, 康剑

引用本文:

黄蕴凯, 沈燕, 王旭, 等. 莽山不同海拔华南五针松径向生长对气候因子的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(6): 605–615.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4381>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 不同海拔温度和降水对新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的影响

Effect of Temperature and Precipitation on Radial Growth of *Larix sibirica* along Altitudinal Gradient on Altay Mountains, Xinjiang, China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 623–632 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4042>

#### 中国东南部不同海拔亚热带森林中马尾松径向生长对气候的响应

Elevational Heterogeneity in Radial Growth–climate Association of *Pinus massoniana* in Southeastern China

热带亚热带植物学报. 2019, 27(6): 633–641 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4038>

#### 滇黄精的潜在分布与气候适宜性分析

Potential Geographical Distribution of *Polygonatum kingianum* and Its Climatic Suitability Analysis

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 439–448 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3874>

#### 澳门5种植物叶变色盛期对气候因子的响应

Effects of Climatic Factors on Leaf Discoloration Peak Period of 5 Species in Macao

热带亚热带植物学报. 2020, 28(6): 574–582 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4232>

#### 全球气候变暖胁迫下的雅鲁藏布江流域植被覆盖度变化驱动机制探讨

Driving Mechanism of Vegetation Coverage Change in the Yarlung Zangbo River Basin under the Stress of Global Warming

热带亚热带植物学报. 2017, 25(3): 209–217 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3685>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 莽山不同海拔华南五针松径向生长对气候因子的响应

黄蕴凯<sup>1,2</sup>, 沈燕<sup>1</sup>, 王旭<sup>2\*</sup>, 周光益<sup>2</sup>, 康剑<sup>3</sup>

(1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 3. 国际竹藤中心, 北京 100102)

**摘要:** 为了解全球升温背景下我国亚热带地区树木生长对气候变化的响应, 基于树木年轮学方法, 在湖南莽山建立不同海拔(1 400、1 200、1 000 m)华南五针松(*Pinus kwangtungensis*)标准年表, 利用响应分析和单年分析研究其径向生长与气候因子的相关关系。结果表明, 海拔 1 400 m 处华南五针松的径向生长与当年 6 月均温和最高温显著负相关, 与当年 4 月的降水量呈显著正相关关系; 海拔 1 200 m 处的径向生长与当年 3 月均温及上年和当年 10 月均温、最低温显著正相关, 与当年 7 月的最低温显著负相关, 与上年 11 月降水量呈显著正相关关系; 海拔 1 000 m 处的径向生长与当年 6 月均温、最高温和当年 1 月的平均温、最低温以及上年 10 月的最低温显著负相关, 与当年 3 月、上年 10 月和当年 10 月的降水呈显著正相关关系。温度和降水共同影响着该地区华南五针松的径向生长, 生长季初期的温度和降水以及夏季温度是影响其生长的关键气候因子。

**关键词:** 华南五针松; 海拔; 树木年轮; 温度; 降水; 莽山

doi: 10.11926/jtsb.4381

## Response of Radial Growth of *Pinus kwangtungensis* at Different Elevations to Climate Factors in Mangsha

HUANG Yunkai<sup>1,2</sup>, SHEN Yan<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>2\*</sup>, ZHOU Guangyi<sup>2</sup>, KANG Jian<sup>3</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 3. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China)

**Abstract:** Under the background of global warming, to achieve a better understanding about tree growth-climate association in subtropical China, tree-ring width chronologies of *Pinus kwangtungensis* at different elevations were established based on the standard method of dendrochronology. The relationship between radial growth and climatic factors was studied by response analysis and single-year analysis. The results showed that radial growth of *P. kwangtungensis* at the altitude of 1 400 m was negatively related to the averaged and maximum temperature in June of the current year, and positively related to precipitation in April of current year. The radial growth at the altitude of 1 200 m was significantly positively correlated with the temperature in March, the average temperature and the lowest temperature in October of last year and current year, negatively correlated with the lowest temperature in July of current year, and significantly positively correlated with the precipitation in November of last year. The radial growth at the altitude of 1 000 m was significantly negatively correlated with the average and

收稿日期: 2021-01-18

接受日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31770664); 中央级科研院所基本科研业务费专项重点项目(RITFKYX2020-23, CAFYBB2017SY017); 广东省林业科技创新项目(2019KJCX026)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31770664); the Special Project for Basic Science Research of Central Research Institutes (Grant No. RITFKYX2020-23, CAFYBB2017SY017), and the Project for Forestry Science and Technology Innovation in Guangdong (Grant No. KJCX026).

作者简介: 黄蕴凯, 研究方向为森林生态学。E-mail: huangyunyunkai@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cawangxu111@126.com

maximum temperature in June of current year, the average temperature in January and the lowest temperature in October of last year. Additionally, the precipitation in March, October of last year and current year was positively correlated with radial growth. Temperature and precipitation together affect the growth of *P. kwangtungensis* in Mangshan. Therefore, the temperature and precipitation at the beginning of the growing season as well as the maximum temperature in summer should be the major climatic factors affecting the radial growth of trees.

**Key words:** *Pinus kwangtungensis*; Elevation; Tree ring; Temperature; Precipitation; Mangshan

近年来,全球气候变暖已经成为热点话题之一<sup>[1]</sup>,冰川融化、海平面上升以及干旱、冰雪灾害等极端天气的出现,不仅对人类的生活造成影响,同时对森林生态系统也产生了重要的影响<sup>[2-5]</sup>。通过研究树木生长与气候之间的关系,对于了解全球气候变化对树木以及整个森林生态系统的影响具有重要的意义。树木年轮学分析因其定年准确、分辨率高、易于采样分析等特点在区域性气候变化研究中广泛运用<sup>[6-7]</sup>,成为研究树木生长与气候之间关系的重要手段。

中国作为全球气候变化的敏感区域,研究中国森林生态系统对气候变化的响应显得极为重要<sup>[8]</sup>。目前国内研究多集中在北部中高纬度地区,以及干旱和半干旱地区<sup>[9-13]</sup>。亚热带地区由于高温和雨水条件丰富,树木生长条件适宜,而变化多端的水热条件可能会出现不规律的生长趋势,成为该区域树木年轮学研究的难点。已有的对亚热带地区树轮气候响应特征的研究多集中在东南季风区<sup>[14]</sup>,研究重点在于树木径向生长对于温度、降水等气候因子之间的相关性,而对于海拔、纬度等地理因素造成的树木径向生长与气候因子之间的响应关系研究相对较少<sup>[15-19]</sup>,因此在该区域开展相关研究显得尤为必要。

湖南莽山位于中亚热带与亚热带分界线的南岭山脉中部,气候温和,雨量充沛,险要的地势和良好的生态环境孕育了丰富的森林资源,因此莽山地区具有重要且独特的生态地位。华南五针松(*Pinus kwangtungensis*)是松科(Pinaceae)常绿针叶乔木,我国华南地区特有的珍稀濒危树种,分布于海拔较高的原生林中,温凉湿润的气候条件为其生长提供了良好的生境<sup>[20]</sup>。本研究以莽山自然保护区内不同海拔的华南五针松树轮样本为研究材料,通过建立树木年轮年表,分析树木径向生长与气候响应的关系,旨在探究不同海拔华南五针松径向生长对气候的响应,为全球气候变暖背景下,亚热带地区树木生长与气候之间关系的研究提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南莽山自然保护区内(112°43'19"~113°0'10" E, 24°52'0"~25°23'12" N),总面积 $2.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,属于南亚热带山地湿润气候。受北部寒冷空气以及南部暖湿气流的交互影响,气候特征独具一格,表现为春季暖湿多雨,夏季炎热而无酷暑,秋季湿冷多雾,冬季寒冷偶有冰雪。年均气温 $17.2^\circ\text{C}$ ,年降水量 $1\ 710.4 \sim 2\ 555.6 \text{ mm}$ ,多集中在4-6月,年均相对湿度为82.8%,初霜期在10月上旬,终霜期在2月中旬。作为我国南有冰雪的最南部地区之一,冬季平均降雪日约4 d,一般在12月至次年2月间,亦有冰冻期。该地区森林覆盖率92.8%,植被类型丰富,按照植被分布带谱从低到高依次为常绿阔叶林地、常绿阔叶和落叶混交林带、针叶阔叶混交林带和高山灌丛山地矮林带<sup>[21]</sup>。华南五针松分布多为纯林或混交林,伴生种有长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、木荷(*Schima superba*)、五列木(*Pentaphylax euryoides*)等。土壤类型复杂,不同海拔高度有红壤、山地红壤、山地黄壤、山地黄棕壤以及山地草甸土等<sup>[22]</sup>。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 野外采样及年表建立

华南五针松多分布于海拔较高、地势陡险的山地,根据其在莽山自然保护区的分布情况,于2020年8月选择海拔1 400、1 200和1 000 m处设置采样地MSA、MSB和MSC(图1,表1),样地立木密度分别为1 556、1 727和1 665 ind./hm<sup>2</sup>。在采样点内选取生长良好、树龄较大的华南五针松,用5.1 mm口径的生长锥在每棵树胸高1.3 m处钻取树芯,取样时穿过髓心,将取出的树芯装入塑料吸管中密封保存,标注取样点、树号以及树高、胸径等信息,带回实验室进一步处理。

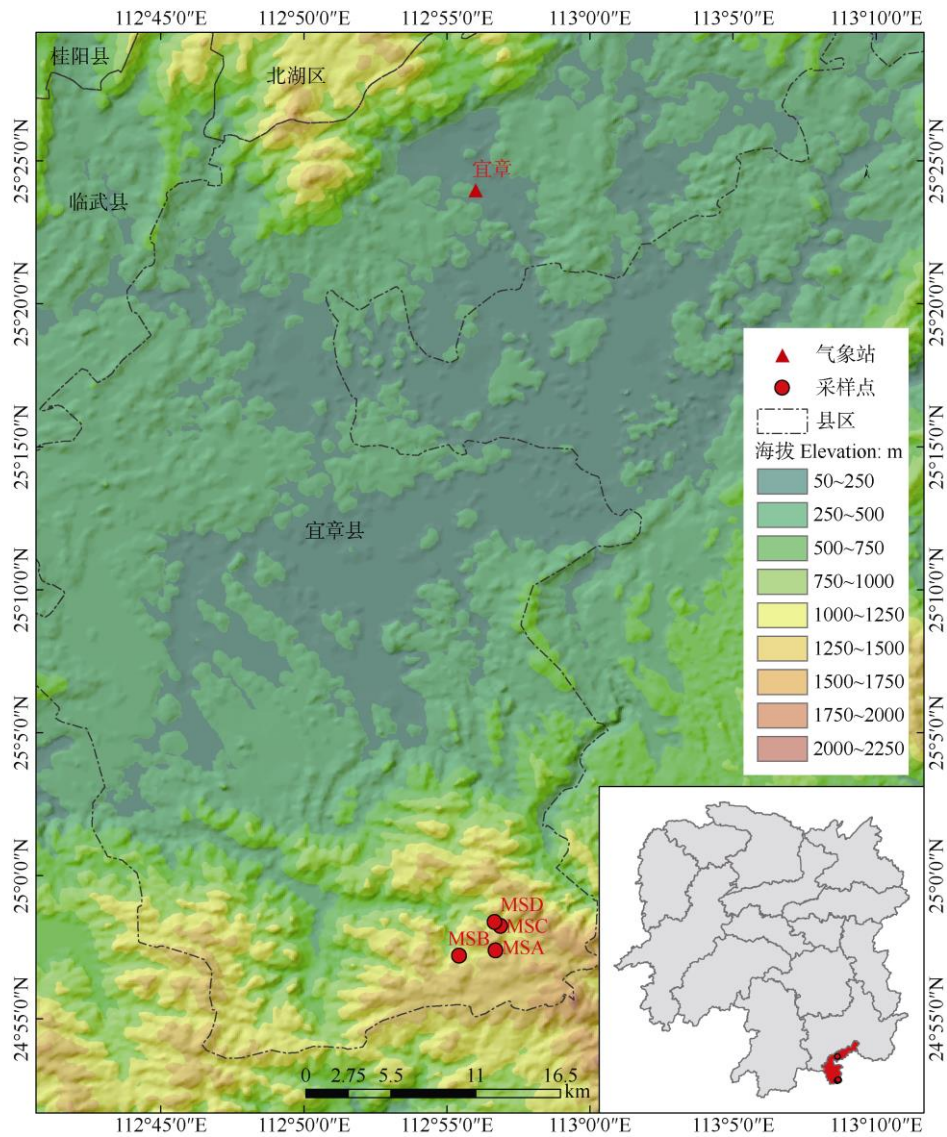


图 1 研究区位置和样点分布。▲: 气象站; ●: 采样点。

Fig. 1 Study area position and plots distribution. ▲: Meteorological station; ●: Plot.

表 1 采样点基本信息

Table 1 Basic information of plots

样点 Plot	海拔 (m) Elevation	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	样芯数量 / 样树 Cores / Tree	平均树高 (m) Mean height	平均胸径 (cm) Mean DBH
MSA	1 400	112°56'43"	24°57'23"	31 / 18	15.7	33.1
MSB	1 200	112°55'26"	24°57'12"	20 / 16	15.6	38.7
MSC	1 000	112°56'53"	24°58'15"	23 / 17	18.7	37.2

将采集到的树芯用胶水固定在有凹槽的木条上, 在室温下自然风干至树芯完全干燥为止。然后分别用 120、400 和 600 目砂纸将树芯表面打磨平整光滑。在显微镜下对树芯进行标年和目视定年, 利用 Lintab 6 年轮分析仪以及配套的 TSAP 软件 (Frank Rinntech, Heidelberg, Germany) 测量树轮宽

度, 精度为 0.001 mm。用 COFECHA 程序对测量和定年的结果进行检验, 对相关系数较低的问题段进行重复检查以及剔除质量较差的序列, 尽量避免人为误差, 以保证定年结果的可靠性<sup>[23-24]</sup>。最后, 将每个样地定年结果使用 ARSTAN 程序<sup>[25-27]</sup>进行去趋势处理, 用 67% 的样条函数进行拟合, 消除与树

木自身年龄有关的生长趋势以及遗传因素等引起的生长波动, 最终建立了 3 个海拔华南五针松的标准年表。同时计算了部分年表参数, 主要包括标准差、平均敏感度、一阶自相关系数、样本相关系数、信噪比和样本总体代表性。

### 1.2.2 气象数据的获取

采取就近的原则, 选择离采样点最近的宜章县气象站记录的气象资料, 气象数据长度为 1960–2019 年, 主要包括月均温(T)、月最高温( $T_{\max}$ )、月最低温( $T_{\min}$ )和月均降水量(PCP)。图 2 为气候数据的多年平均, 可以看出, 该区域具有雨热同期的规律, 最低温出现在 1 月(约 4℃), 最高温在 7 月, 达 34℃。降水集中在 3–8 月, 最大降水量在 6 月, 8 月份开始降水逐渐减少, 12 月份降水量最低。

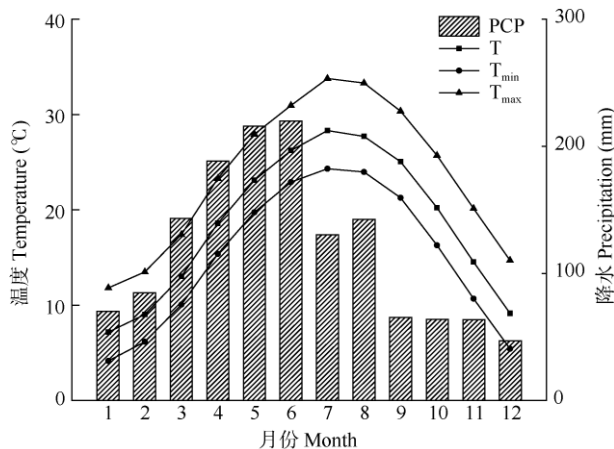


图 2 宜章 1960–2019 年的平均温度(T)、最高温( $T_{\max}$ )、最低温( $T_{\min}$ )和降水量(PCP)年内分布

Fig. 2 Annual distribution of mean temperature (T), maximum temperature ( $T_{\max}$ ), minimum temperature ( $T_{\min}$ ) and precipitation (PCP) from 1960–2019 in Yizhang

### 1.2.3 数据处理

在树轮宽度测量以及交叉定年过程中发现有样芯存在树龄偏小以及与主序列相关系数较低的情况, 在多次检查定年结果后剔除了部分问题序列, 选择 1990–2019 年作为公共区间进行相关分析。利用 Dendroclim 2002 软件<sup>[28]</sup>对不同海拔华南五针松标准年表的公共区间(1990–2019)与月值气候因子(均温、最高温、最低温和降水量)间进行相关分析, 以确定不同海拔华南五针松径向生长与气候因子之间的关系。同时利用 Excel 2016 软件进行数据处理, 由 SigmaPlot 12.5 软件作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 树轮年表统计特征

对 3 个海拔华南五针松建立树轮年表(表 2, 图 3), 海拔 1 200 m 标准年表的时间跨度最大, 达到 139 a (1882–2020 年), 海拔 1 000 m 标准年表为 99 a (1922–2020 年), 海拔 1 400 m 标准年表的最短, 仅有 71 a (1950–2020 年)。3 个海拔年表标准差为 0.172~0.297, 平均敏感度为 0.165~0.222, 均大于 0.150, 说明年表所包含的气候信息量相对较多, 树木的径向生长对环境的变化相对敏感, 气候因子的限制作用强<sup>[29]</sup>。海拔 1 400、1 200 和 1 000 m 的华南五针松标准年表的序列间相关系数分别为 0.258、0.212 和 0.224, 信噪比分别为 9.752、4.840 和 5.198。一阶自相关系数均在 0.53 以上, 说明上一年的气候会对当年树木生长造成影响。样本总体代表性(expressed population signal, EPS)反映了年表的可靠程度, 所建 3 个海拔年表的 EPS 均大于临界值 0.85。因此, 本研究中所建立的华南五针松 3 个不同海拔的标准年表对气候因子具有一定的敏感度, 年表中包含较多的气候信息, 各个统计指标特征良好, 年表的质量适用于进行气候相关分析。

### 2.2 不同海拔华南五针松径向生长对气候因子的响应

由于上年气候变化也会影响当年树木的生长, 即“滞后效应”<sup>[30]</sup>, 因此选择了上年 7 月至当年 12 月的气候因子进行相关分析。结果表明(图 4), 海拔 1 400 m 华南五针松的径向生长与当年 6 月的 T 和  $T_{\max}$  呈显著负相关( $r=-0.35$ 、 $-0.37$ ;  $P<0.05$ ), 与当年 4 月的 PCP 呈显著正相关( $r=0.39$ ,  $P<0.05$ )。海拔 1 200 m 的径向生长受温度影响较大, 表现为与上年 10 月、当年 3 和 10 月的 T 呈显著正相关( $r=0.35$ 、 $0.41$ 、 $0.34$ ;  $P<0.05$ ), 与当年 3 月的  $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  以及上年和当年 10 月的  $T_{\min}$  呈显著正相关关系( $r=0.37$ 、 $0.42$ 、 $0.42$ 、 $0.36$ ,  $P<0.05$ ), 与当年 7 月的  $T_{\min}$  则呈显著负相关( $r=-0.34$ ,  $P<0.05$ ), 与上年 11 月的 PCP 呈显著正相关( $r=0.45$ ,  $P<0.05$ )。海拔 1 000 m 的径向生长与当年 1 月的 T、 $T_{\min}$  和上年 11 月的  $T_{\min}$  呈显著正相关( $r=0.43$ 、 $0.55$ 、 $0.45$ ;  $P<0.05$ ), 与当年 6 月的 T、 $T_{\max}$  呈显著负相关关系( $r=-0.39$ 、 $-0.43$ ), 与上年和当年 11 月以及当年 3 月的 PCP 呈显著正相关( $r=0.36$ 、 $0.43$ 、 $0.31$ ;  $P<0.05$ )。

表 2 标准年表的主要统计特征

Table 2 Statistical characteristic of standard chronologies

	MSA	MSB	MSC
序列长度 Chronology length	1950–2020	1882–2020	1922–2020
均值 Mean index	0.968	0.972	0.975
标准差 Standard deviation	0.172	0.261	0.297
平均敏感度 Mean sensitivity	0.165	0.176	0.222
公共区间 Common intervals	1990–2019	1990–2019	1990–2019
一阶自相关系数 First-order autocorrelation	0.532	0.602	0.761
样本间相关系数 Correlation coefficient for all series	0.258	0.212	0.224
树间相关系数 Correlation coefficient among trees	0.257	0.213	0.224
树内相关系数 Correlation coefficient within trees	0.501	0.432	0.485
信噪比 Signal-to-noise ratio	9.752	4.840	5.198
样本总体代表性 Expressed population signal	0.907	0.859	0.887

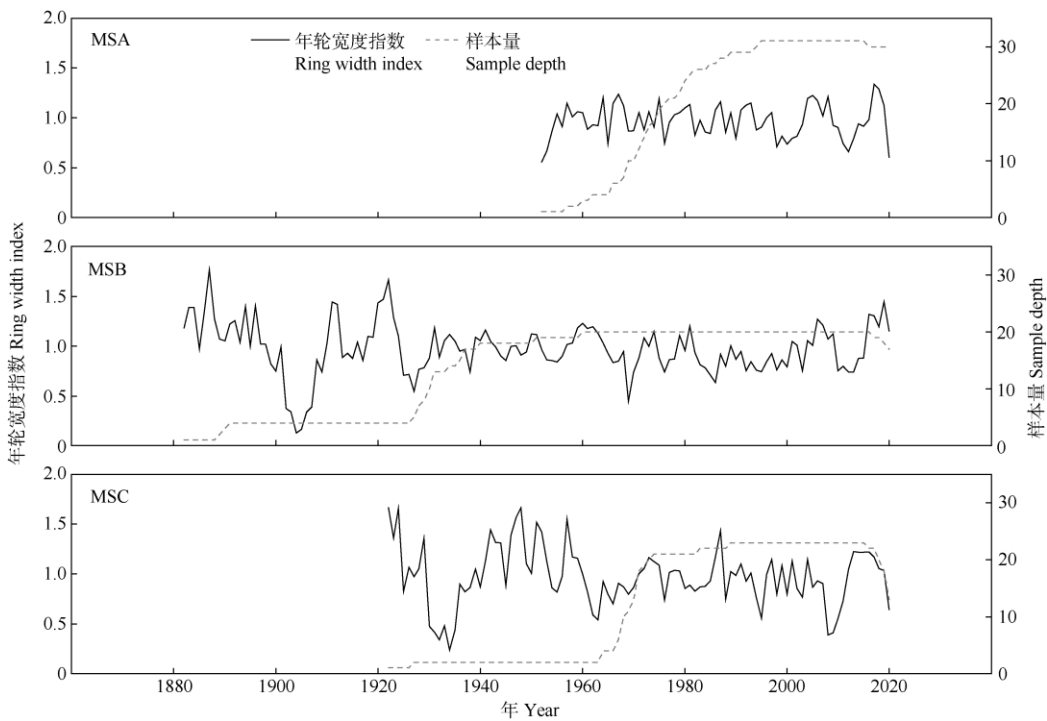


图 3 不同海拔华南五针松标准年表

Fig. 3 Standard chronologies of *Pinus kwangtungensis* at different elevations

### 2.3 年表的单年分析

**海拔 1 400 m** 海拔 1 400 m 华南五针松树轮宽度指数在 2017 年最大, 为 1.336; 在 2012 年最小, 为 0.66。从图 5 可见, 树轮宽度指数最大年(2017 年)的 6 月平均温距平为 -0.27, 即 2017 年 6 月的平均温低于多年的平均值, 而最小年(2012 年)的 6 月平均温距平为 0.227, 高于多年的平均值。降水方面, 2017 年 4 月的降水距平为 98.24, 明显高于多年平均值, 2012 年 4 月的降水距平为 -42.05, 低于多年平均值。

**海拔 1 200 m** 海拔 1 200 m 华南五针松树轮宽度指数在 2016 年最大, 为 1.319; 2013 年最小, 为 0.741。从图 6 可见, 树轮宽度指数最大年(2016 年)的上年 10 月平均温距平为 1.113, 即 2015 年 10 月的平均温高于往年 10 月的平均值, 而树轮宽度为 1.26, 2013 年 10 月为 0.46, 这也证明了上年 3 和 10 月及当年 10 月的平均温与华南五针松的径向生长有正相关关系。降水方面, 2016 年上年 11 月的降水量距平为 212.88, 明显高于多年的平均值, 2013 年的上年 11 月的为 -122.68, 同样明显低于多年的

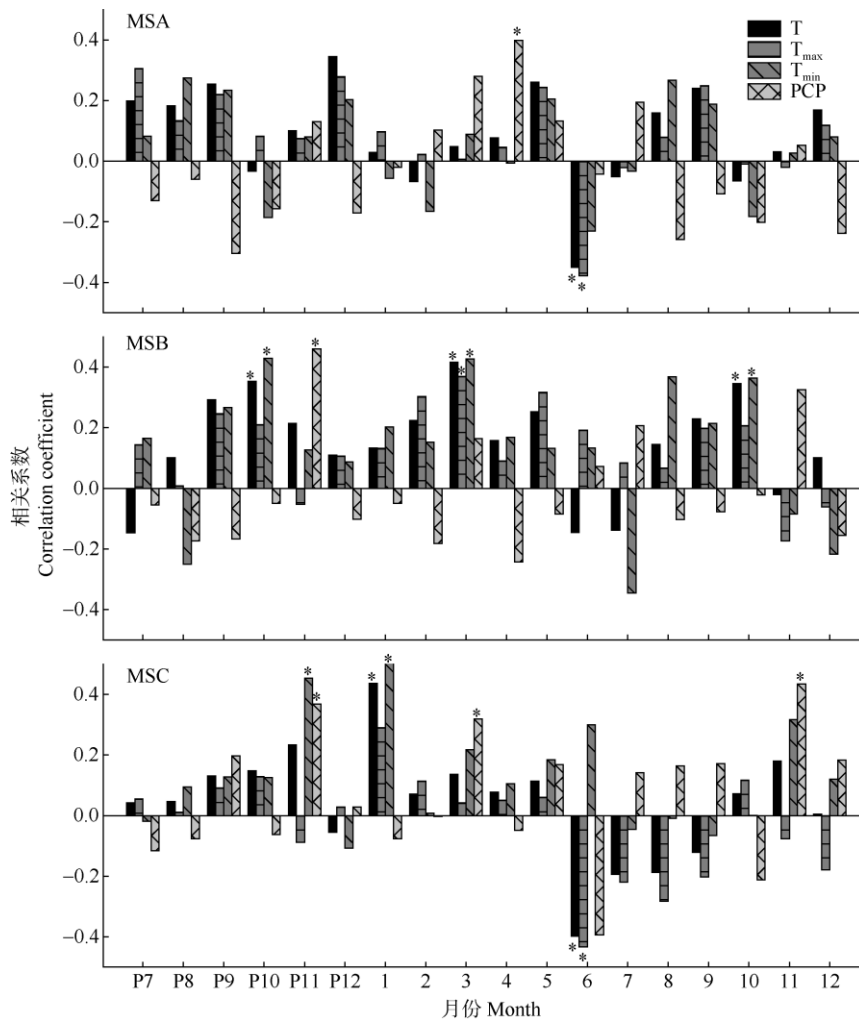


图 4 不同海拔华南五针松标准年表与月气候因子的相关系数。\*:  $P < 0.05$ 。P7~P12: 上一年的 7-12 月。下图同。

Fig. 4 Correlation coefficients between monthly climate factors and chronologies of *Pinus kwangtungensis* at different elevations. \*:  $P < 0.05$ ; P7-P12: July to December of last year. The same is following Figures.

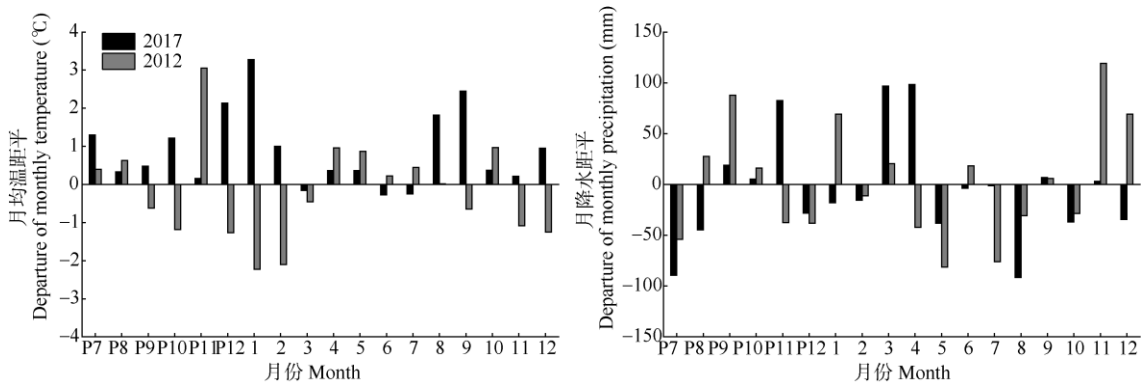


图 5 海拔 1400 m 极端年均温、降水距平分析

Fig. 5 Analysis of departure mean temperature and precipitation in climatic extreme year at an elevation of 1400 m

平均值。

**海拔 1 000 m** 海拔 1 000 m 华南五针松树轮宽度指数在 2013 年最大(1.225), 2008 年最小

(0.387)。从图 7 可见, 华南五针松树轮宽指数最大年(2013 年)的当年 1 月平均温距平为 0.37, 高于多年平均值, 最小年(2008 年)当年 1、2 月平均温距平

分别为-2.72 和-3.6, 明显低于多年平均值。2013 年当年 6 月的平均温距平为-0.57, 低于多年平均值, 而 2008 年 6 月的平均温距平为 0.72, 高于多年平均值。降水方面, 2013 年上半年 11 月和当年 3、

11 月的降水量距平分别为 122.68、68.24 和 14.42, 均高于多年平均值; 而 2008 年上半年 11 月和当年 3、11 月的降水量距平为-65.41、-24.12 和-15.27, 低于多年平均值。

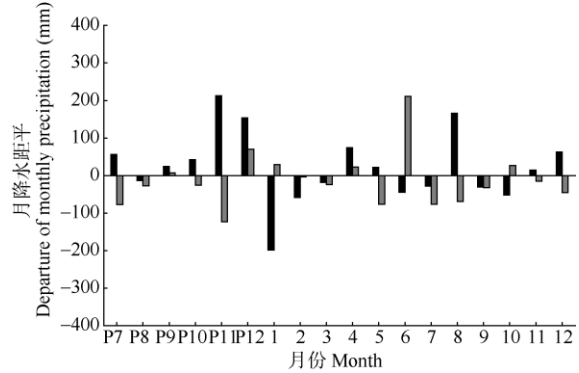
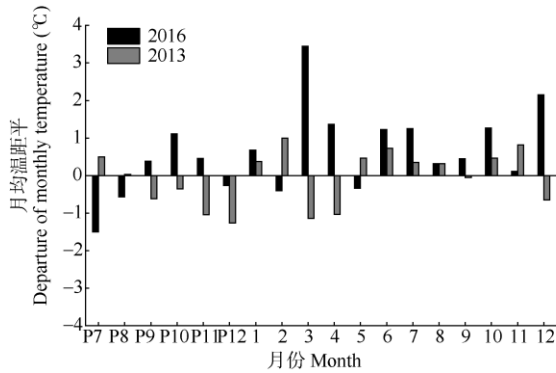


图 6 海拔 1 200 m 极端年平均温、降水距平分析

Fig. 6 Analysis of departure of mean temperature and precipitation in climatic extreme year at an elevation of 1 200 m

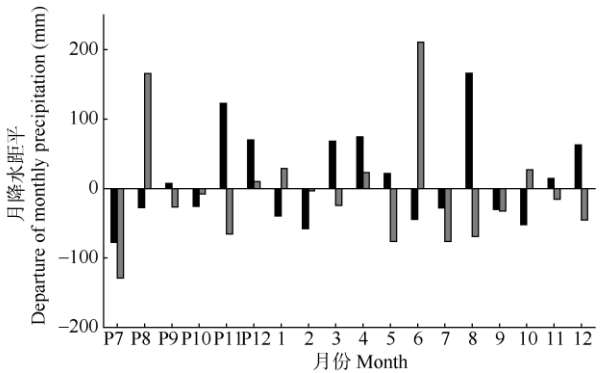
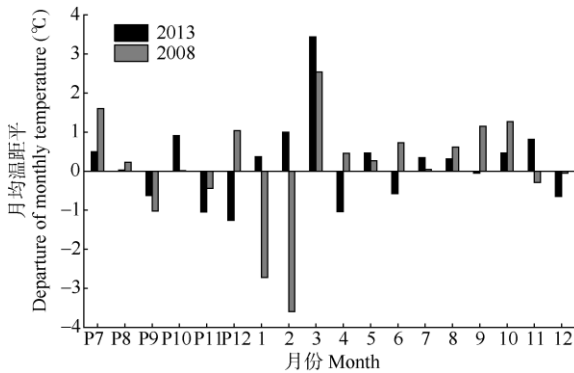


图 7 海拔 1 000 m 极端年平均温、降水距平分析

Fig. 7 Analysis of departure mean temperature and precipitation in climatic extreme year at an elevation of 1 000 m

### 3 结论和讨论

#### 3.1 华南五针松径向生长与气候因子的关系

通过对公共区间 1990 到 2019 年近 30 年华南五针松径向生长与逐月气候因子的相关分析结果中可以看出, 温度和降水对不同海拔树木径向生长影响程度不同。海拔 1 400 和 1 000 m 处华南五针松径向生长与当年 6 月平均温和最高温呈显著负相关, 海拔 1 200 m 处的径向生长与当年 7 月的最低温显著负相关。保护区内夏季最高温达 34℃, 高温会加快水分蒸发, 导致土壤和树体内含水量降低, 从而抑制树木生长, 形成了窄轮<sup>[30]</sup>; 曹受金的研究也表明夏季高温抑制了南岭地区华南五针松的生长<sup>[31]</sup>。海拔 1 200 m 处的径向生长与当年 3 月温度

的相关性达显著水平, 呈正相关, 可能是春季温度的回暖, 有利于树木打破休眠, 使细胞生长活跃, 光合速率升高, 提高了碳水化合物的积累, 为生长季前期树木的生长提供充足的能量供应<sup>[32]</sup>, 这种响应特征在大尺度范围具有普遍性<sup>[33-35]</sup>。上年 10 月和当年 10 月的平均温、最低温与海拔 1 200 m 处华南五针松径向生长呈显著正相关, 说明生长季末期较高的温度有利于延长生长季, 能够积累更多的营养物质以供来年树木的生长, 从而表现出促进作用<sup>[36]</sup>。在全球升温的背景下, 生长期延长可能会促进华南五针松径向生长, 而夏季温度过高可能会对华南五针松径向生长产生抑制<sup>[37-40]</sup>。

降水方面, 上年 11 月的降水与海拔 1 200 和 1 000 m 处华南五针松的径向生长呈正相关, 这可



能是由于研究区内冬季降水相对较少,在水分缺失的环境中,叶片会关闭气孔以减弱蒸腾作用,此时较多的降水会缓解水分缺失的压力,从而表现出对树木生长有利<sup>[41]</sup>。研究区内从 3 月开始降水量逐渐增大,3 月降水量与海拔 1 000 m 处华南五针松径向生长呈显著正相关,4 月降水量与海拔 1 400 m 处华南五针松径向生长也呈显著正相关关系。春季华南五针松逐渐进入生长期,土壤有效水分的增加促进了树木养分的吸收,有利于细胞的生长以及制造碳水化合物能力的提高<sup>[42]</sup>,对华南五针松的生长有促进作用。随着全球温度的升高,降水格局发生剧烈变化,导致干旱发生的频率增加和干旱程度的明显加剧<sup>[43-44]</sup>。在中国亚热带地区,这种趋势主要表现为旱季降水频率减少、雨季强降雨时间频发<sup>[45-46]</sup>,降水格局的变化使华南五针松径向生长对降水更为敏感,生长季降水的增多有利于华南五针松的生长。

海拔高度的不同所带来的水分分配以及土壤成分的改变会导致树木径向生长对气候因子的响应差异,一般来讲,高海拔树木径向生长与温度密切相关,低海拔树木径向生长与降水密切相关<sup>[47]</sup>。本研究结果表明,温度和降水共同影响着该地区华南五针松的生长,可能与其生物学特性和海拔分布有关,另外根据《莽山志》记载,莽山自然保护区海拔 1 200 m 以上在冬季会出现逆温现象,可能对其生长也有影响。有研究表明,限制森林不同海拔树木生长的因素存在区域差异,温度并不是限制树木生长的主要因素<sup>[48-49]</sup>,山区复杂的地形可能会导致水热条件出现很大的差异,温度和降水对树木生长的作用并不是简单的线性关系,两者对树木的径向生长有复杂的交互作用<sup>[50]</sup>。

### 3.2 特征年形成与气候因子的关系

树木生长会受极端气候条件的影响,而这种影响很难从相关分析中体现出来,因此在相关分析的基础上进行了单年分析。不同海拔华南五针松径向生长与气候因子的相关关系在单年分析中得到了基本印证。年表极端值在不同海拔高度分布不一致,海拔 1 400 m 处最大年的大多数月平均温以及 3、4 月的降水都明显高于多年平均值,说明 2017 年的气候条件是相对适合华南五针松生长的,因此形成了最大年。3 月温度对海拔 1 200 m 处华南五针松径向生长影响显著,单年分析结果显示 2016 年 3 月的温度高于多年平均值近 3.5℃,因此华南五针

松在当年形成了宽轮。海拔 1 000 m 处华南五针松树轮宽度指数在 2008 年最小,仅有 0.387,原因可能是 2008 年 1-2 月我国南方遭受特大雨雪冰冻灾害,对南岭地区森林造成严重损害,海拔 1 000 m 处华南五针松生长受到严重抑制,导致极窄轮的形。这与单年分析结果中 2008 年当年 1-2 月的温度低于多年平均值近 4℃左右相符合。有研究结果显示,2008 年冰雪灾害造成南岭山地树木受到不同程度机械损伤,海拔 500~1 000 m 为受损“重灾区”,而海拔 1 300 m 以上几乎无灾害迹象<sup>[51-52]</sup>,说明 2008 年冰雪灾害对海拔 1 000 m 处华南五针松生长影响很大,对海拔 1 200 和 1 400 m 的影响较小。

### 参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on climate Change (IPCC). Global Warming of 1.5°C: Climate Change 2018 [EB/OL]. [2019-08-08]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [2] LI L, CHEN J K. Impacts of climate change on wild plants and conservation strategies [J]. *Biodiv Sci*, 2014, 22(5): 549-563. doi: 10.3724/SPJ.1003.2014.14124.  
黎磊, 陈家宽. 气候变化对野生植物的影响及保护对策 [J]. *生物多样性*, 2014, 22(5): 549-563. doi: 10.3724/SPJ.1003.2014.14124.
- [3] CHEN L, HUANG J G, DAWSON A, et al. Contributions of insects and droughts to growth decline of trembling aspen mixed boreal forest of western Canada [J]. *Glob Change Biol*, 2018, 24(2): 655-667. doi: 10.1111/gcb.13855.
- [4] WEBER M G, FLANNIGAN M D. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate: Impact on fire regimes [J]. *Environ Rev*, 1997, 5(3/4): 145-166. doi: 10.1139/a97-008.
- [5] YIN Y H, MA D Y, WU S H. Climate change risk to forests in China associated with warming [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 493. doi: 10.1038/s41598-017-18798-6.
- [6] WU X D. Application of tree ring analysis in the study of environmental change [J]. *Quaternary Sci*, 1990(2): 188-196.  
吴祥定. 树木年轮分析在环境变化研究中的应用 [J]. *第四纪研究*, 1990(2): 188-196.
- [7] FANG K Y, CHEN Q Y, LIU C Z, et al. Advances in the study of dendrochronology [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(7): 1879-1888. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0125.  
方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 等. 树木年代学的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1879-1888. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0125.
- [8] LIU L M, ZHAO Y H, GAO L S. Response of radial growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation to climate factors [J]. *J NE For*

- Univ, 2014, 42(5): 6–8,12. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.20140522.012.
- 刘兰妹, 赵羿涵, 高露双. 杉木人工林径向生长对气候因子的响应 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(5): 6–8. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.20140522.012.
- [9] LI T, HE X Y, CHEN Z J. Response of radial growth of *Quercus mongolica* to climate change in southeastern China: A case study of Qianshan Mountain [J]. Chin J Appl Ecol, 2014, 25(7): 1841–1848. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0124.
- 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 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1841–1848. doi: 10.13287/j.1001-9332.2014.0124.
- [10] ZHOU P, HUANG J G, LIANG H X, et al. Effects of temperature and precipitation on radial growth of *Larix sibirica* along altitudinal gradient on Altay Mountains, Xinjiang, China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(6): 623–632. doi: 10.11926/jtsb.4042.
- 周鹏, 黄建国, 梁寒雪, 等. 不同海拔温度和降水对新疆阿尔泰山西伯利亚落叶松径向生长的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(6): 623–632. doi: 10.11926/jtsb.4042.
- [11] KANG J, JIANG S W, HUANG J G. Radial growth response of four dominant tree species to climate factors in the Sayan Range of the Altai Mountains, Russia [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(17): 6135–6146. doi: 10.5846/stxb201908081665.
- 康剑, 蒋少伟, 黄建国. 阿尔泰山萨彦岭4种优势树种径向生长对气候因子的响应 [J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6135–6146. doi: 10.5846/stxb201908081665.
- [12] LIU Y, ZHANG X J, SONG H M, et al. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qingling Mountains, central China [J]. Boreas, 2010, 38(38): 285–291. doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00065.x.
- [13] SHANG H M, HONG J C, ZHANG R B, et al. Tree-ring recorded 522-year precipitation from previous October to May northeastern Tibet, China [J]. J Mt Sci, 2018, 36(6): 821–832. doi: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000378.
- 尚华明, 洪建昌, 张瑞波, 等. 树轮记录的西藏东北部过去552 a 上年10月至当年5月降水量变化 [J]. 山地学报, 2018, 36(6): 821–832. doi: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000378.
- [14] QIAO J J, WANG T, PAN L, et al. Responses of radial growth to climate change in *Pinus massoniana* at different altitudes and slopes [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(7): 2231–2240. doi: 10.13287/j.1001-9332.201907.011.
- 乔晶晶, 王童, 潘磊, 等. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2231–2240. doi: 10.13287/j.1001-9332.201907.011.
- [15] DONG Z P, ZHENG H Z, FANG K Y, et al. Responses of tree-ring width of *Pinus massoniana* to climate change in Sanming, Fujian Province [J]. J Subtrop Resour Environ, 2014, 9(1): 1–7. doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2014.01.001.
- 董志鹏, 郑怀舟, 方克艳, 等. 福建三明马尾松树轮宽度对气候变化的响应 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(1): 1–7. doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2014.01.001.
- [16] HOU X Y, SHI J F, LI L L, et al. Growth response of *Abies fargesii* to climate in Shennongjia Mount of Hubei Province, Southeastern China [J]. Chin J Appl Ecol, 2015, 26(30): 689–696. doi: 10.13287/j.1001-9332.20141223.022.
- 候鑫源, 史江峰, 李玲玲, 等. 湖北神农架巴山冷杉径向生长对气候的响应 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(30): 689–696. doi: 10.13287/j.1001-9332.20141223.022.
- [17] PENG J F, WANG T. Response and model of tree-rings growth to climate factors at Huangbaishan Mountain in Henan Province [J]. Sci Geo Sin, 2015, 35(5): 644–651. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.05.018.
- 彭剑峰, 王婷. 黄柏山树轮生长对气候因子的响应及模拟 [J]. 地理科学, 2015, 35(5): 644–651. doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.05.018.
- [18] SHI J F, LU H Y, WAN J D, et al. Using the ring width of *Pinus armandii franch* to reconstruction of winter semi-annual temperature in the eastern edge of Qin Mountains [J]. Quaternary Sci, 2009, 29(4): 831–836. doi: 10.3969/j.issn.1001-7410.2009.04.20.
- 史江峰, 鹿化煜, 万建东, 等. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘近百年冬半年温度 [J]. 第四纪研究, 2009, 29(4): 831–836. doi: 10.3969/j.issn.1001-7410.2009.04.20.
- [19] WANG T, SUN Y J, QIAO J J. Response of *Pinus massoniana* tree-ring width in the Jiangle Area of Fujian Province to climate change [J]. J Beijing For Univ, 2019, 41(9): 30–39. doi: 10.13332/j.1000-1522.20190067.
- 王童, 孙玉军, 乔晶晶. 将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30–39. doi: 10.13332/j.1000-1522.20190067.
- [20] TAO C, LI X X, WANG Q C, et al. Relationships between geographical distribution of endangered *Pinus kwangtungensis* and climate in China [J]. Plant Sci J, 2012, 30(6): 577–583. doi: 10.3724/SPJ.1142.2012.60577.
- 陶翠, 李晓笑, 王清春, 等. 中国濒危植物华南五针松的地理分布与气候的关系 [J]. 植物科学学报, 2012, 30(6): 577–583. doi: 10.3724/SPJ.1142.2012.60577.
- [21] ZHANG L, SU Z Y, CHEN B G. Interspecific relationships in the forest community dominated by *Pinus kwangtungensis*, a Chinese native species [J]. Acta Ecol Sin, 2006(4): 1063–1072. doi: 10.3321/j.issn:

- 1000-0933.2006.04.012.
- 张璐, 苏志尧, 陈北光. 中国特有植物——华南五针松群落的种间关系 [J]. 生态学报, 2006(4): 1063–1072. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.04.012.
- [22] SHEN Y, LUO J P, WANG X, et al. Characteristics of *Pinus kwangtungensis* community at Mangshan, Hunan Province [J]. J CS Univ For Technol, 2016, 36(2): 1–7. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.02.001.
- 沈燕, 罗江平, 王旭, 等. 湖南莽山华南五针松群落特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(2): 1–7. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2016.02.001.
- [23] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. Tree-Ring Bull, 1983, 43(3): 69–78. doi: 10.1006/biol.1999.0214.
- [24] GRISSINO-MAYER H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. Tree-Ring Res, 2001, 57(2): 205–221.
- [25] 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 Bull, 1981, 41: 45–53.
- [26] ZHAO S D, JIANG Y, JIAO L, et al. A comparative analysis of ARSTAN and the dplr package of R language in analyses of tree-ring chronologies [J]. Acta Ecol Sin, 2015, 35(22): 7494–7502. doi: 10.5846/stxb201403300597.
- 赵守栋, 江源, 焦亮, 等. ARSTAN 程序和 R 语言 dplr 扩展包进行树轮年表分析的比较研究 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7494–7502. doi: 10.5846/stxb201403300597.
- [27] LI Z S, LIU G H, FU B J, et al. Influence of different detrending methods on climate signal in tree-ring chronologies in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2011, 35(7): 707–721. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00707.
- 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 不同去趋势方法对树轮年表气候信号的影响——以卧龙地区为例 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 707–721. doi: 10.3724/SP.J.1258.2011.00707.
- [28] BIONDI F, WAIKUL K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. Comput Geosci, 2004, 30(3): 303–311. doi: 10.1016/j.cageo.2003.11.004.
- [29] SMITH K T. An organismal view of dendrochronology [J]. Dendrochronologia, 2008, 26(3): 185–193. doi: 10.1016/j.dendro.2008.06.002.
- [30] LI Y, LI S L, YANG C T, et al. Responses of tree-ring width of *Pinus kwangtungensis* to climatic factors in Nanling [J]. J Subtrop Resour Environ, 2016, 11(1): 26–31. doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2016.01.005.
- 李越, 李胜利, 杨昌腾, 等. 南岭华南五针松树轮宽度对气候因子的响应 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(1): 26–31. doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2016.01.005.
- [31] CAO S J. The study on the response of tree-ring width of Pinaceae tree species to climate factors and climate reconstruction in Nanling region [D]. Changsha: Center South University Forestry Technol, 2015. doi: 10.7666/d.Y2892232.
- 曹受金. 南岭山地松科树种径向生长与气候因子关系及气候重建研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015. doi: 10.7666/d.Y2892232.
- [32] ZHENG S X, SHANGGUAN Z P. Study on relationship between tree-ring and climatic change [J]. Sci Silv Sin, 2006, 42(6): 100–107. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.06.017.
- 郑淑霞, 上官周平. 树木年轮与气候变化关系研究 [J]. 林业科学, 2006, 42(6): 100–107. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.06.017.
- [33] DUAN J P, ZHANG Q B, LU L X, et al. Regional-scale winter-spring temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China [J]. Clim Dyn, 2012, 39(3/4): 919–928. doi: 10.1007/s00382-011-1232-9.
- [34] CHEN F, YUAN Y J, WEI W S, et al. Tree ring-based winter temperature reconstruction for Changting, Fujian, subtropical region of Southeast China, since 1850: Linkages to the Pacific Ocean [J]. Theor Appl Climatol, 2012, 109(1/2): 141–151. doi: 10.1007/s00704-011-0563-0.
- [35] PELLERIN M, DELESTRADE A, MATHIEU G, et al. Spring tree phenology in the Alps: Effects of air temperature, altitude and local topography [J]. Eur J For Res, 2012, 131(6): 1957–1965. doi: 10.1007/s10342-012-0646-1.
- [36] FAN Z X, BRAUNING A, CAO K F. Annual temperature reconstruction in the central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings [J]. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 97–107. doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.003.
- [37] BAI Q F, HUO Z G, LI S K, et al. Comparison of accumulated temperature above 10°C before and after the year of 1978 in China [J]. Chin J Appl Ecol, 2008, 19(8): 1810–1816.
- 柏秦凤, 霍治国, 李世奎, 等. 1978 年前、后中国  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温对比 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1810–1816.
- [38] ZHENG J, GE Q, HAO Z, et al. Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes [J]. Clim Change, 2006, 77(3): 449–462. doi: 10.1007/s10584-005-9038-6.
- [39] CHEN X, HU B, YU R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China [J]. Glob Change Biol, 2005, 11(7): 1118–1130. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.00974.x.
- [40] HASENAUERA H, NEMANI RR, SCHADAUER K, et al. Forest

- growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria [J]. *For Ecol Manage*, 1999, 122(3): 209–219. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00010-9.
- [41] CHAVES M M, FLEXAS J, PINHEIRO C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. *Ann Bot*, 2009, 103(4): 551–560. doi: 10.1093/aob/mcn125.
- [42] PENG J F, GOU X H, CHEN F H, et al. The responses of growth ring width variations of *Larix sibirica* Ledeb to climatic change in eastern Tianshan Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(8): 2723–2731. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.08.040.  
彭剑锋, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析 [J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2723–2731. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2006.08.040.
- [43] SENEVIRATNE S I, LUTHI D, LITSCHI M, et al. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe [J]. *Nature*, 2006, 443(7108): 205–209. doi: 10.1038/nature05095.
- [44] KUANG Y W, XU Y M, ZHANG L, et al. Dominant trees in a subtropical forest respond to drought mainly via adjusting tissue soluble sugar and proline content [J]. *Front Plant Sci*, 2017(8): 802–815. doi: 10.3389/fpls.2017.00802.
- [45] PARRY M L, CANZIANI O F, PALUTIKOF J P, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UL: Camb Univ Press, 2007.
- [46] DONG S Y, GAO X J. Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report [J]. *Climate Change Res*, 2014, 10(1): 56–59. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.012.  
董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读 [J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 56–59. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.012.
- [47] ZHANG H, SHAO X M, ZHANG Y. Research progress on the response of radial growth to climatic factors at different altitudes [J]. *J Earth Environ*, 2012, 3(3): 845–854. doi: 10.7515/JEE201203001.  
张慧, 邵雪梅, 张永. 不同海拔高度树木径向生长对气候要素响应的研究进展 [J]. *地球环境学报*, 2012, 3(3): 845–854. doi: 10.7515/JEE201203001.
- [48] PENG J F, GOU X H, CHEN F H, et al. Characteristics of ring-width chronologies of *Picea crassifolia* and their responses to climate at different elevations in the Anyemaqen Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, 27(8): 3268–3276. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.08.021.  
彭剑锋, 勾晓华, 陈发虎, 等. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉树轮生长特性及其对气候的响应 [J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3268–3276. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.2007.08.021.
- [49] CHEN L, HUANG J G, STADT K J, et al. Drought explains variation in the radial growth of white spruce in western Canada [J]. *Agric For Meteorol*, 2017, 233: 133–142. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.11.012.
- [50] D'ARRIGO R, WILSON R, LIEPERT B, et al. On the divergence problem in northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible cause [J]. *Glob Planet Change*, 2008, 60(3/4): 289–305. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.03.004.
- [51] LI Y D. Nanling Mountain Nature Reserve following the low temperature and sleet disaster, the sensitive area which needs to be rescued. [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, 44(6): 2–4. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.06.002.  
李意德. 低温雨雪冰冻灾害后的南岭山脉自然保护区——亟待拯救的生态敏感区域 [J]. *林业科学*, 2008, 44(6): 2–4. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2008.06.002.
- [52] WANG X, HUANG S N, ZHOU G Y, et al. Effects of the frozen rain and snow disaster on the dominant species of *Castanopsis* forests in Yangdongshan shierdushui provincial nature reserve of Guangdong [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, 45(9): 42–45. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.09.008.  
王旭, 黄世能, 周光益, 等. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区栲类林建群种的影响 [J]. *林业科学*, 2009, 45(9): 42–45. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2009.09.008.