

引用格式:贾龙玉,管增艳,常瑞英,石松林,彭培好.贡嘎山树线上方杜鹃灌木径向生长对气候变化的响应特征[J].山地学报,2021,39(5): 646-657.

JIA Longyu, GUAN Zengyan, CHANG Ruiying, SHI Songlin, PENG Peihao. Response of radical growth of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* to climate change above treeline in the Gongga Mountain. [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 646-657.

## 贡嘎山树线上方杜鹃灌木径向生长对气候变化的响应特征

贾龙玉<sup>1a, 1b</sup>, 管增艳<sup>1a, 1b</sup>, 常瑞英<sup>2</sup>, 石松林<sup>1a, 1b\*</sup>, 彭培好<sup>1a, 1b</sup>

(1. 成都理工大学 a. 旅游与城乡规划学院; b. 生态资源与景观研究所, 成都 610059;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:** 气候变暖深刻影响着高山树线上方的灌木生长,然而目前其对气候变化的响应特征仍不清楚。本文以贡嘎山树线上方的大叶金顶杜鹃(*Rhododendron faberi* subsp. *Prattii*)为研究对象,分别采用负指数函数法(CD)、断面积增量(BAI)以及区域曲线标准法(RCS)去除生长趋势,建立标准化年表,分析大叶金顶杜鹃生长特征,并用相关分析、偏相关分析和滑动相关分析来探讨大叶金顶杜鹃径向生长与气候因子的关系。结果如下:(1) Mann-Kendall 趋势检验结果表明 1980—2018 年断面积增量 BAI 增加趋势最为显著;(2) 相关分析结果表明 BAI 与前一年 7 月最高温度、前一年 9 月平均温度、当年 7 月和 9 月最高温度以及平均温度呈现显著正相关关系,与前一年以及当年 6 月、7 月、9 月相对湿度呈现显著负相关关系;在季节尺度上,BAI 与前一年 7—11 月平均温度、当年 7—9 月平均温度和当年 4—9 月最高温度呈现显著正相关,与前一年 7—9 月以及当年 2—9 月平均相对湿度显著负相关;(3) 响应函数和偏相关分析分析结果表明当年 7 月最高温度是影响杜鹃灌木径向生长的关键生态因子;(4) 滑动相关分析揭示了在全球变暖背景下,分布在贡嘎山树线上方的大叶金顶杜鹃的径向生长将会增加。本研究结果有助于更加全面地理解与预测气候变化对树线上方灌木生长的影响。

**关键词:** 气候变化;径向生长;大叶金顶杜鹃;树轮生态学;贡嘎山

**中图分类号:** Q948

**文献标志码:** A

气候变化对树木生长具有直接影响<sup>[1-4]</sup>。高山树线是树木在极端环境下所能达到的分布上限,树线树木的生长对气候变化响应十分敏感<sup>[5-6]</sup>,是研究树木生长对气候变化响应模式的理想对象<sup>[7-9]</sup>。近几十年来,对于高山过渡带树轮气候学的研究,大多数学者聚焦于森林乔木的树轮年代学研究,包括气候重建、树木生长与气候因子关系以及林线随气候变化的迁移等<sup>[10-14]</sup>,这些研究有助于更好地了解气候变化历史以及气候对树木生长的影响。相比之

下,对于分布在高山林线之上的灌木树轮年代学研究则相对较少<sup>[15-17]</sup>。高山灌木广泛分布在高纬度地区,是高山过渡带非常重要的木本植物。已开展的相关研究<sup>[18-20]</sup>表明,在高寒地区极端生长条件下,灌木仍具有被应用于树轮气候学研究的潜力<sup>[21-22]</sup>,同时对灌木进行树轮年代学研究也有利于将目前已有的年轮网络从林线拓展至林线以上的区域<sup>[23]</sup>。

树木年轮宽度是反映树木径向生长对气候变化

收稿日期(Received date): 2021-02-05;改回日期(Accepted date): 2021-09-03

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2016YFC0502105)。[National Key R&D Program of China (2016YFC0502105)]

作者简介(Biography): 贾龙玉(1996-),男,四川巴中人,硕士研究生,主要研究方向:全球变化。[JIA Longyu (1996-), male, born in Bazhong, Sichuan province, M.Sc. candidate, research on global change] E-mail: jialongyu@stu.cdut.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 石松林(1986-),男,四川巴中人,博士,讲师,主要研究方向:全球变化。[SHI Songlin (1986-), male, born in Bazhong, Sichuan province, Ph.D., lecturer, research on global change] E-mail: shisonglin17@cdut.edu.cn

响应的敏感性指标<sup>[24-26]</sup>。研究显示植被年轮宽度与夏季温度以及冬季温度显著正相关<sup>[12]</sup>,温度升高有利于植被生长的进一步加快<sup>[27]</sup>,高山树线的树木生长受到低温的限制<sup>[28-29]</sup>,温度升高将促进高山树线区域树木的生长<sup>[12, 30-31]</sup>。然而,分布在树线上方的灌木与气候的关系却仍然存在争议。一些研究表明,高原植被年轮宽度与温度因子显著负相关,温度升高抑制其径向生长<sup>[32]</sup>,灌木年轮宽度与5—7月温度因子表现出显著负相关关系<sup>[33]</sup>,即气候变暖抑制灌木生长;还有一些研究却表明温度升高促进灌木生长<sup>[34]</sup>,年轮宽度与最低温度表现出显著正相关趋势<sup>[23]</sup>。

针对这一争议,本文以川西地区贡嘎山树线上方的大叶金顶杜鹃为研究对象,运用年轮学方法采集灌木年轮样品,建立年表,探讨近30 a来贡嘎山树线上方大叶金顶杜鹃灌木生长动态及其对气候变化的响应特征。研究区域与研究对象的选择基于以下原因,中国西南山区是杜鹃属植物现代分布中心之一<sup>[35]</sup>,杜鹃在亚高山针叶林到树线之上均有分布,是青藏高原地区最有价值的进行年轮研究的灌木<sup>[23]</sup>。不同杜鹃植株之间彼此可以进行交叉定年,同时年轮宽度对气候变化比较敏感,杜鹃适宜用于树木年代学研究<sup>[23]</sup>,其灌木年轮宽度记录了强烈的气候信号<sup>[34]</sup>。通过实验设计与结果分析,本研究旨在揭示限制贡嘎山大叶金顶杜鹃径向生长的关键气候因子,并探讨在气候变暖背景下大叶金顶杜鹃的径向生长动态,进而深入探究树线上方灌木生长对气候变化的响应机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

贡嘎山国家级自然保护区(101°29′~102°12′E, 29°01′~30°05′N)地处青藏高原东南缘(图1),分布在横断山脉的中心区域,是横断山脉的最高峰。贡嘎山自然保护区地处亚热带,主要受亚热带季风气候影响,但由于处于四川盆地向青藏高原的过渡带上,高大的山体对西风环流和西南季风以及夏季来自太平洋强大暖湿气流的流向具有一定的阻滞作用,使得贡嘎山的气候特征有所变化,干季和湿季分明。巨大的谷岭高差以及南北走向的山势,导致了气候垂直带谱明显,东西坡差异显著。通过康定气

象站的气象数据,分析了1980—2018年的月平均温度和降水量的变化(图2),最暖月是7月,最冷月是1月,降水主要集中在5—9月。巨大的海拔差异导致气候随海拔升高而变化,形成了保护区内复杂多样的植被垂直带谱,贡嘎山自然环境条件复杂多样,植被种类和植物群落相当丰富。本研究采样点位于贡嘎山针叶林树线之上的杜鹃原始灌丛,属于典型的高山灌丛。

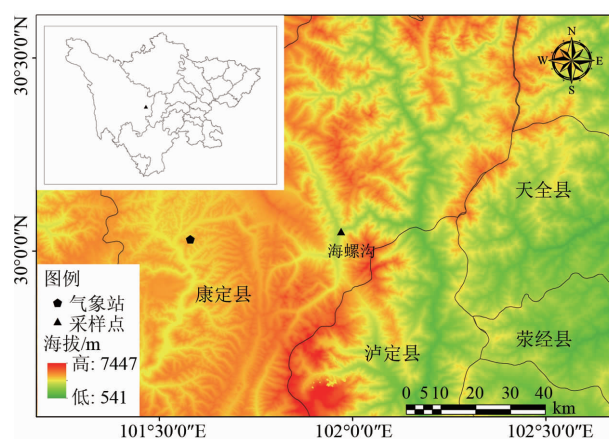


图1 年轮采样点和气象站地理位置

Fig. 1 Location of tree-ring sample site and meteorological station

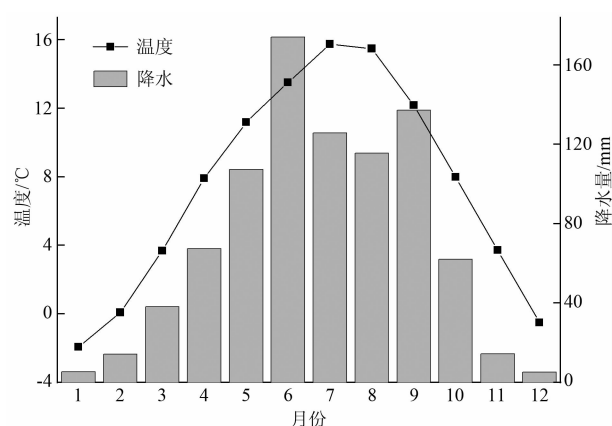


图2 1980—2018年康定气象站月平均温度与月降水量

Fig. 2 Monthly mean temperature and precipitation at Kangding meteorological station from 1980 to 2018

### 1.2 样品采集、处理及年表建立

本研究于2018年9月对贡嘎山亚高山针叶林树线之上海拔为4071 m的大叶金顶杜鹃灌丛(101.98°E, 29.54°N)进行年轮样品采样。采用锯圆盘的方式采集每个杜鹃灌丛中基径最大的植株,共采集29个圆盘。在实验室内将采集的树轮样品自然晾干后,分别用80、240、360、600、1000和2000

目的砂纸对其进行打磨和抛光,直至年轮清晰可见。以年轮圆盘中心为起点,以树皮为终点,画出三条线段,线段之间的角度大于 60°,采用骨架图法先进行目视交叉定年,使用树木年轮测量仪(LINTAB, Rinntech, Germany,分辨率为 0.01 mm)测量每条线段方向的年轮宽度,使用 COFECHA 软件对测得的年轮宽度数据进行质量检验,最终筛选出 46 个合格样芯用于后续分析。

分别采用保守去趋势法(CD)、断面积增量(BAI)以及区域曲线标准化(RCS)方法去除杜鹃生长趋势<sup>[36]</sup>,建立树轮年表<sup>[37]</sup>,并用 Mann-Kendall 趋势检验法检验所得生长序列是否存在显著的变化趋势。保守去趋势法是应用 ARSTAN 软件采用负指数函数方法(negative exponential curve)去除生长趋势。曲线标准化方法是首先生成区域曲线,将年轮宽度对齐形成层年龄,再计算每个年轮宽度与区域曲线的比值<sup>[38]</sup>。断面积计算公式为:

$$BAI = \pi \times (R_n^2 - R_{n-1}^2) \tag{1}$$

式中,BAI 为断面积增量(mm<sup>2</sup>);R 为年轮半径(mm);n 为对应年轮形成年份(a)<sup>[39]</sup>。

年表统计结果如表 1 所示,采用 CD,BAI 以及 RCS 去趋势方法建立的标准年表的信噪比分别为 17.800,20.282,14.766,均远远高于 3,序列间相关系数为 0.279,0.306,0.243,表明年表中蕴含着丰富的气候信息;平均敏感度分别为 0.322,0.339 以及 0.320,意味着包含较多的高频信号,而样本群体表达信号分别为 0.947,0.953,0.938,均超过 0.85,说明 3 类年表数据可靠性较高,且年表的样本量可代表该地区所有杜鹃个体的总体生长特征<sup>[40]</sup>。其中 BAI 年表的各项年表统计参量均高于其余 2 类年表,表明对于大叶金顶杜鹃灌木来说,采用 BAI 去趋势得到的年表数据更加适合用于探讨树木生长与气候因子的关系。

### 1.3 数据分析

为了分析贡嘎山近 30 a 的气候变化特征,用线性回归方法对各气候因子进行年际变化趋势分析。气象数据来源于 1980—2018 年中国康定气象站(<http://data.cma.cn>)。为了揭示位于树线上方大叶金顶杜鹃灌木对气候变化的响应以及影响随时间的变化趋势,利用 R 语言中的 treeclim 程序包对 BAI 与气候因子分别进行相关分析、偏相关分析以

及滑动相关分析。所有分析用 R 语言(4.0.3)以及 Origin 2018 完成。

表 1 贡嘎山大叶金顶杜鹃 3 类去趋势年表统计信息

Tab.1 Statistics of chronologies of CD, BAI and RCS of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* radial in the Gongga Mountain

年表	负指数 函数法	断面积 增量/mm <sup>2</sup>	区域曲线 标准法
信噪比	17.800	20.282	14.766
平均敏感度	0.332	0.339	0.320
序列间的平均相关系数	0.279	0.306	0.243
样本总体代表性	0.947	0.953	0.938

## 2 结果

### 2.1 气候变化特征

研究区 1980—2018 年的各气候因子的年际变化趋势如图 3 所示。自 1980 年开始,年平均最低温度、最高温度和平均温度均显著上升( $p < 0.001$ ),增温速率分别为 0.238、0.504 和 0.313 °C/10a;年降水量未表现出显著增加的趋势( $p > 0.05$ ),相对湿度表现出显著下降的趋势( $p < 0.05$ ),下降速率为 0.938%/10a(图 3),日照时长也表现出显著下降的趋势( $p < 0.05$ ),下降速率为 32.55 h/10a。

### 2.2 生长动态特征

为了去除年龄对杜鹃径向生长的影响,本文采用了 3 种标准去趋势方法,采用 Mann-Kendall 趋势法来检验所获得 3 条生长序列变化是否是自然波动还是存在某种变化趋势。Mann-Kendall 趋势检验法结果表明,除了采用标准去趋势得到的年表没有显著的增加趋势,BAI 以及 RCS 的趋势序列均表现出显著的增加趋势。同时也有研究表明从 1986—2015 年,贡嘎山树线处的冷杉仅仅断面积增量表现出了显著的增加趋势<sup>[41]</sup>。这说明相比于标准去趋势法以及局部区域曲线法,断面积增量指数对气候变化更加敏感。图 4 则表明了三条去趋势序列高度相关( $p < 0.005$ ),因此在接下来的分析中本文以通用的断面积增量(BAI)来表示大叶金顶杜鹃的生长动态。1980—1998 年,大叶金顶杜鹃生长较慢和比较稳定,1998—2011 年,其生长保持在较高水平,2011—2018 年,其生长呈显著下

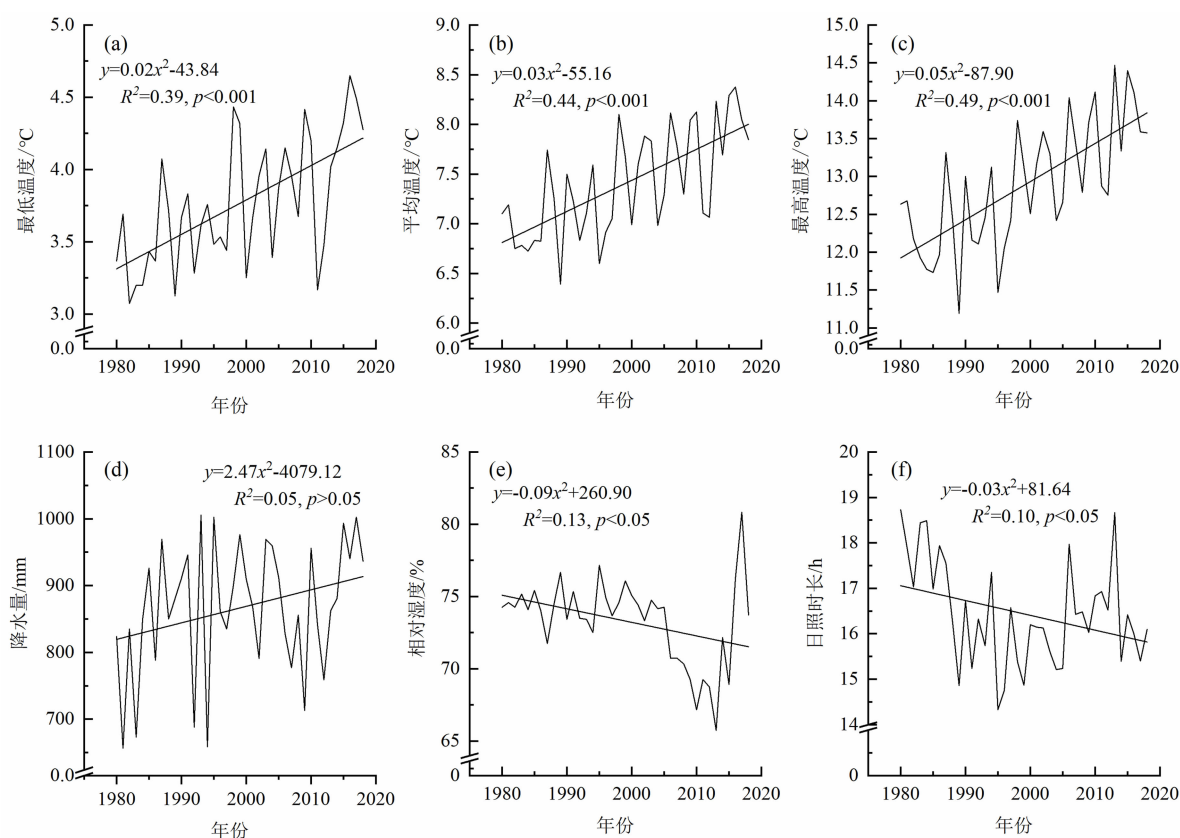


图3 贡嘎山气候因子年际变化趋势:(a)最低温度;(b)平均温度;(c)最高温度;(d)降水量;(e)相对湿度;(f)日照时长

Fig. 3 Trends of the annual climate factors in Gongga Mountain: (a) minimum temperature; (b) mean temperature; (c) maximum temperature (d) precipitation; (e) relative humidity; (f) sunshine duration

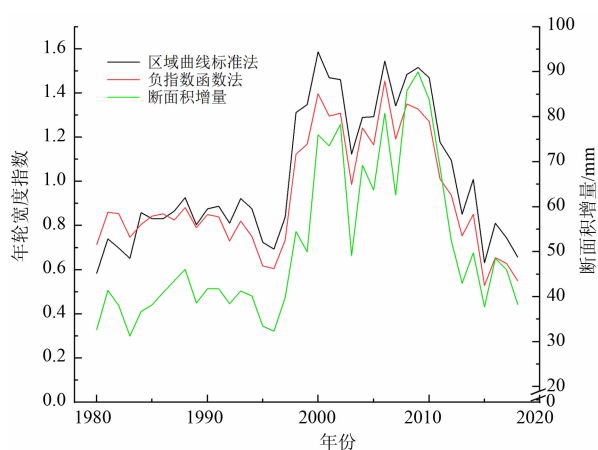


图4 大叶金顶杜鹃径向生长趋势

Fig. 4 Growth variations of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattiiradial*

降趋势。

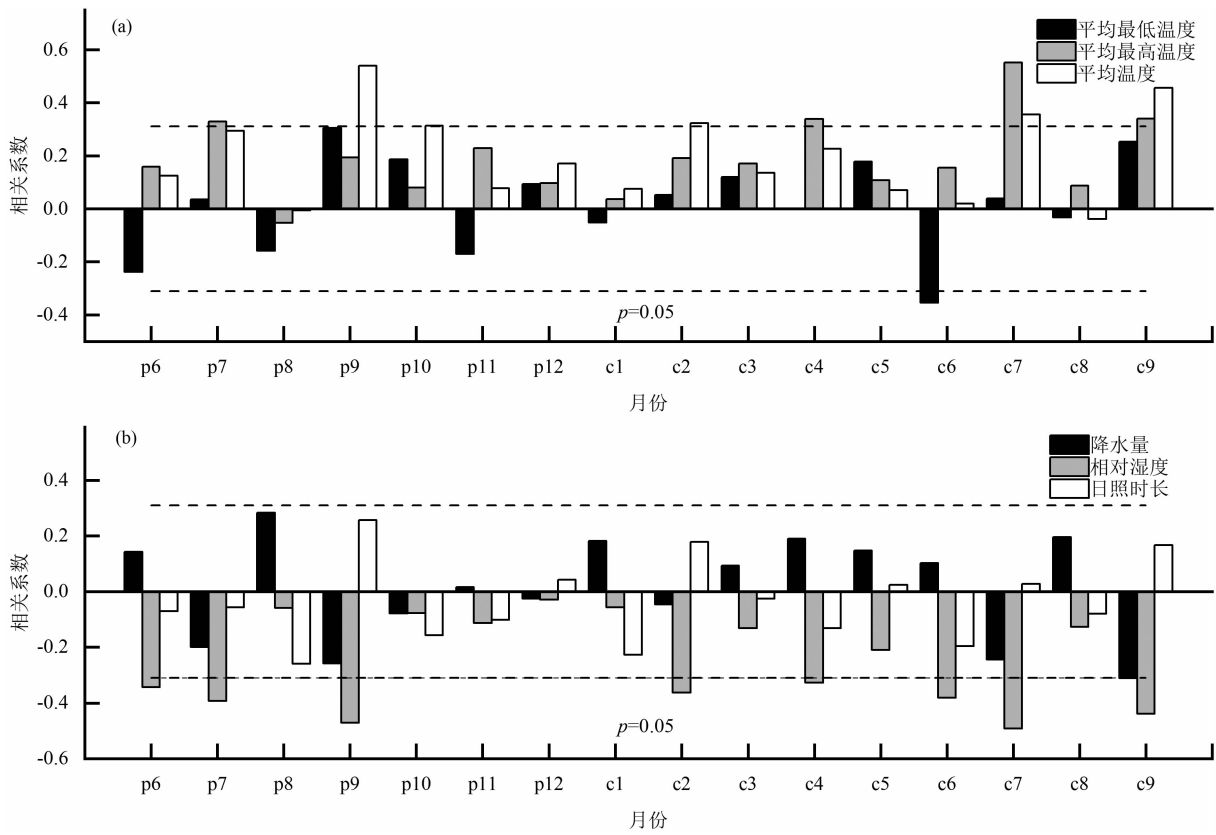
### 2.3 气候响应分析

杜鹃的断面积增量与月尺度气候因子的相关分析结果表明,BAI与当年4月、7月和9月以及前一年的7月平均最高温度呈现出显著的正相关关系

( $P < 0.05$ ),与当年2月、7月和9月以及前年9月的平均温度显著正相关( $P < 0.05$ ),与当年6月平均最低温度显著负相关( $P < 0.05$ );与前一年的6、7、9月以及当年的2、4、6、7和9月的相对湿度均表现出显著负相关关系( $P < 0.05$ )(图5);而与降水和日照时长的关系较弱( $P > 0.05$ )。

对杜鹃的BAI与季节尺度气候因子进行相关性分析,发现BAI与前一年7—11月、当年7—9月平均温度以及当年4—7月平均最高温度均显著正相关( $P < 0.05$ );与前一年6—9月以及当年2—9月相对平均湿度显著负相关( $P < 0.05$ );与前一年6—8月的日照时长表现出显著负相关关系( $P < 0.05$ ),与降水的关系不显著( $P > 0.05$ )。以上结果表明温度和相对湿度是影响杜鹃灌木径向生长的主要因子。

用响应函数对大叶金顶杜鹃的BAI与温度以及湿度因子进行分析,结果表明当年7月的平均最高温度以及相对湿度对大叶金顶杜鹃径向生长



注:p:上一年;c:当年。

图5 1980—2018 年大叶金顶杜鹃断面积增量与 (a):月平均温度、最低温度、最高温度以及 (b):总降水量、相对湿度和日照时长的相关关系

Fig.5 Correlation coefficients of *Rhododendron faberi* subsp. *Pratti* basal area increment (BAI) series with (a) monthly mean minimum temperature, mean maximum temperature, mean temperature and (b) total precipitation, relative humidity and sunshine duration from 1980 to 2018

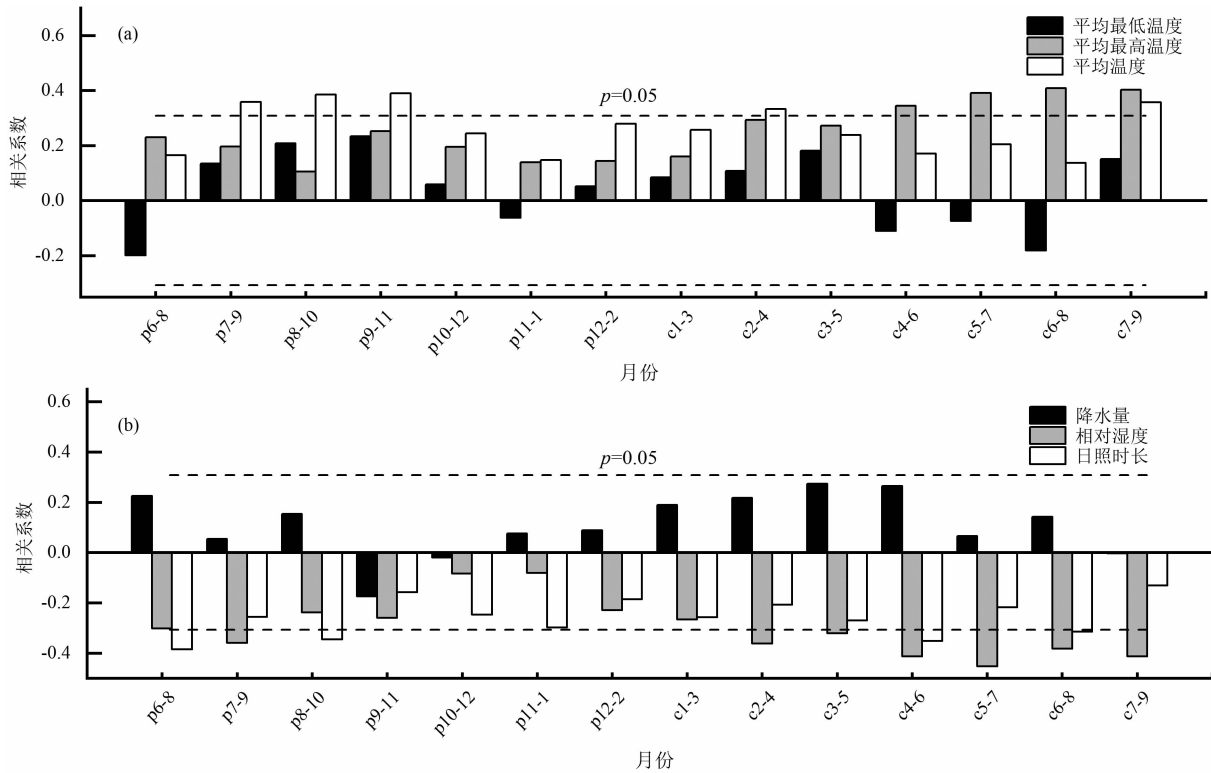
的影响最为显著(图7)。当年7月的平均最高温度促进其生长,相对湿度则抑制其生长。为了确定影响大叶金顶杜鹃生长的关键的气候因子,进一步采用偏相关分析,发现当年7月平均最高温度为控制因子时,大叶金顶杜鹃的BAI与当年7月相对湿度的偏相关系数为 $-0.37(P < 0.05)$ ,当控制当年7月的相对湿度时,大叶金顶杜鹃的BAI与当年7月的平均最高温度的偏相关系数为 $0.47(P < 0.01)$ 。相对于当年7月相对湿度,BAI与当年7月平均最高温度之间表现出更为显著的相关关系,这说明相对于7月相对湿度来说,当年7月平均最高温度对大叶金顶杜鹃的生长影响更为强烈。

通过对杜鹃BAI与气候因子进行滑动相关分析,从而揭示杜鹃径向生长与气候因子的响应关系随时间变化的稳定性。1980—2018年,杜鹃径向生长与当年7月的平均温度、最高温度(显著正相关

关系)以及相对湿度(显著负相关)随时间呈现出较为稳定趋势(图8),这表明了温度升高以及湿度降低会促进大叶金顶杜鹃灌木生长;对当年6月最低温度的响应关系(显著负相关)随时间呈现出显著增强的趋势(图7),这表明了6月最低温度对杜鹃径向生长的抑制作用呈现增强的趋势。

### 3 讨论

树木宽度年表中既记录了长期的气候信号,也包含着由于生长过程中而引起的非气候信号<sup>[42]</sup>。采用适宜的去趋势方法去除树轮生长过程中的年龄和胸径趋势,从而突出其中的气候信号,对于准确分析树木生长与气候之间关系至关重要<sup>[43]</sup>。图4表明,三种去趋势方法得到的3条生长序列彼此高度相关,表现出相对一致的变化趋势。在1980—2018年,相比于RCS以及STD,BAI表现出更低的时间趋



注:p:上一年;c:当年。

图6 1980—2018年大叶金顶杜鹃断面积增量与(a):季节尺度(3个月)平均温度、最低温度、最高温度以及(b):季节尺度(3个月)总降水量、相对湿度和日照时长的相关关系

Fig. 6 Correlation coefficients of *Rhododendron faberi* subsp. *Pratiibasal* area increment (BAI) series with (a) mean minimum temperature, mean maximum temperature, mean temperature and (b) total precipitation, relative humidity and sunshine duration in 3 month from 1980 to 2018

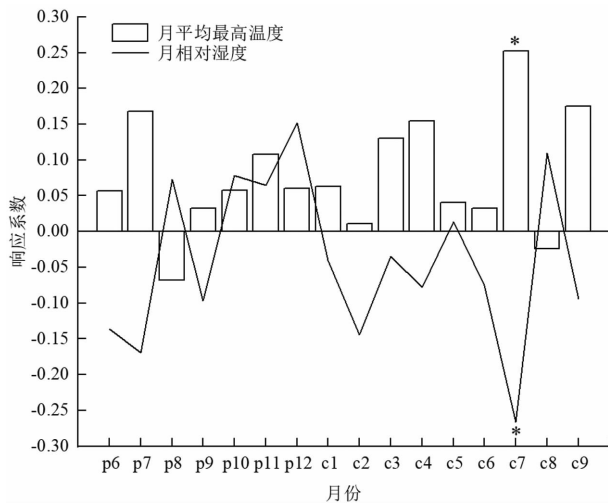


图7 大叶金顶杜鹃断面积增量与月相对湿度和月平均最高温度的响应关系(1980—2018年)

Fig. 7 Response coefficients of *Rhododendron faberi* subsp. *Pratiibasal* area increment (BAI) series with month relative humidity and mean maximum temperature from 1980 to 2018

注:\*表示 $P < 0.05$ 。

势,从侧面说明了BAI的准确性。本文用BAI来表示杜鹃的径向生长动态,Mann-Kendall趋势检验法结果表明大叶金顶杜鹃径向生长表现出显著增加的趋势。

大量研究表明,在高山树线区域,温度往往是影响树木生长的主要限制因子<sup>[38, 44-45]</sup>。在本研究中,采用相关分析、偏相关分析以及滑动相关分析探讨了大叶金顶杜鹃BAI与气候因子的关系。结果表明,夏季温度,尤其是7月最高温度是促进该区域大叶金顶杜鹃径向生长的最为关键的因素。这很有可能是因为在生长季,更高的温度有利于根的生长以及叶片光合作用,从而促进其径向生长<sup>[46]</sup>。也有前人研究发现在高山地区,较低的冬季温度,将引起土壤根部活动减弱,从而成为树木生长的限制因子<sup>[47]</sup>。但是本研究表明,大叶金顶杜鹃生长与冬季温度关系并不显著,并未发现类似的影响。这可能是因为冬季大量的积雪覆盖在茂密的杜鹃灌丛叶面上,对土壤具有一定保温作用。同样也有一些



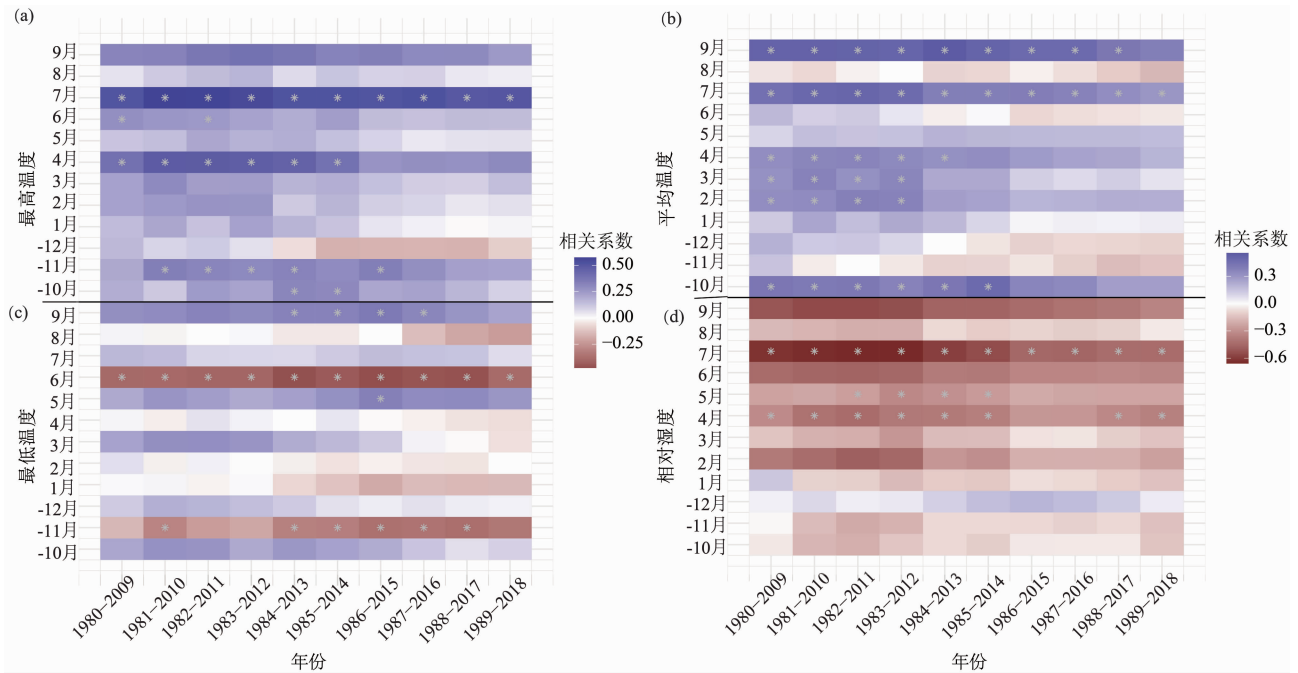


图 8 大叶金顶杜鹃断面积增量与前一年 10 月至当年 9 月 (a) 最高温度、  
(b) 平均温度、(c) 最低温度以及 (d) 相对湿度的滑动相关分析 (30 a)

Fig. 8 The 30 a window moving correlations of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* basal area increment  
(BAI) series with (a) maximum temperature, (b) mean temperature, (c) minimum temperature and (d) relative humidity

研究表明在高海拔地区夏季温度与灌木生长呈现负相关关系。温度对树木的抑制作用则有可能是因为随着温度上升,增长的呼吸速率超过了增加的光合速率导致的<sup>[48-49]</sup>。生长在青藏高原东缘的杂多县大果圆柏(*Sabina tibetica*)灌木也发现了类似的抑制作用<sup>[50]</sup>。过高的温度了减少土壤中的水分,导致灌木出现一定的水分胁迫,以至于灌木叶片通过延缓气孔关闭的时间降低光合作用进而抑制树木的生长<sup>[4]</sup>。本文结果表明,降水与大叶金顶杜鹃生长的相关关系并不显著。这是由于贡嘎山同时受到西南季风和太平洋强大暖湿气流的影响,且大叶金顶杜鹃分布于海拔 4000 m 处,降水极其充沛,所以并不存在上述水分胁迫。本文的研究结果与王文志等相一致,大叶金顶杜鹃年轮记录了与冷杉类似的气候信号,其发现贡嘎山的树线冷杉生长与 7 月温度显著正相关,与降水不存在显著的相关性<sup>[41]</sup>。

大叶金顶杜鹃径向生长与前一年和当年 6 月、7 月以及 9 月的相对湿度显著负相关(图 6)。这可能是因为 6—10 月,贡嘎山地区受西南季风和太平洋强大暖湿气流的作用,出现强大的降水过程。过

多的降水导致气温降低,相对湿度增加,使得云雾量常年较大。过多的云雾量减少到达地面的太阳辐射,从而抑制植物的光合作用速率甚至生长发育<sup>[51-53]</sup>。在四川小金地区的研究表明,较少的日照时数和较高的空气相对湿度,会间接减少净光合作用产物的累积,阻碍树木生长发育<sup>[54]</sup>。大叶金顶杜鹃 BAI 与前一年 9 月温度显著正相关,意味着秋季温度升高将促进次年灌木的径向生长,同时也暗示着大叶金顶杜鹃的径向生长对气候的响应表现出一定的滞后性。在贡嘎山树线区域发现了冷杉径向生长与前一年 9 月温度存在显著的正相关关系<sup>[41]</sup>。在青藏高原中东部地区,树木的树轮宽度指数与前一年各月平均温度显著正相关<sup>[55]</sup>。这些研究结果与本文相一致,前一年生长季末期的气候因子可以通过影响发芽、有机物质的合成以及其他营养器官的生长进而影响当年树木的径向生长<sup>[56]</sup>。

最近的研究表明,对于高海拔灌木而言,灌木对气候变暖的响应并不一致。LIANG 等(2012)通过对藏东南的雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)进行研究,发现与 7 月最低温度升高显著促进其径向生

长<sup>[23]</sup>。李宗善等研究表明,更高的7月温度,有助于鹧鸪山地区陇属杜鹃(*Rhododendron przewalskii*)的生长<sup>[34]</sup>。也有一些研究表明,温度升高抑制灌木的生长。石松林等研究发现气候变暖抑制拉萨河大果圆柏(*Sabina tibetica*)的径向生长<sup>[32]</sup>。最近的研究结果发现生长在半干旱地区的树木生长受到抑制,甚至死亡,这主要是由于温度增加所引起的水分胁迫所导致的<sup>[57]</sup>。本研究表明,大叶金顶杜鹃生长从1980至2018年呈现出增加趋势,特别是从2000至2011年,杜鹃径向生长明显呈加速趋势。为了揭示这一异常加速时期的原因,在图9中我们探讨了对杜鹃生长影响最强的气候因子(当年7月最高温度与当年7月相对湿度)与BAI的关系。结果发现2000—2011年时期BAI变化趋势与7月平均最高温度变化趋势相一致,与平均相对湿度相反。这意味着更高的7月温度以及更低的湿度将促进大叶金顶杜鹃的生长。图7表明,随着时间的增加,7月相对湿度对杜鹃的生长抑制作用有所减弱,这有可能是因为杜鹃对环境因子有所适应,其对湿度因子的敏感性降低,而7月最高温度对杜鹃生长的促进作用则一直较稳定,对温度因子始终保持着较高的敏感性,这意味着7月温度的升高在杜鹃生长的适宜温度范围内。以上结果表明着随着气候进一步变暖,大叶金顶杜鹃生长将会进一步增加。

## 4 结论

本文以贡嘎山大叶金顶杜鹃为研究对象,采用树木年轮学的方法探讨大叶金顶杜鹃的生长动态特征以及对气候变化的响应特征,主要结论如下:

(1) Mann-Kendall 趋势检验结果表明,在气候变化背景下,大叶金顶杜鹃的生长呈显著增加趋势。

(2) 相关分析表明 BAI 与前一年7月最高温度、前一年9月平均温度、当年7月、9月最高温度以及平均温度呈现显著正相关关系,与前一年以及当年6月、7月、9月相对湿度呈现显著负相关关系;在季节尺度上,BAI 与前一年7—11月平均温度、当年7—9月平均温度和当年4—9月最高温度呈现显著正相关,与前一年7—9月以及当年2—9月平均相对湿度显著负相关。

(3) 响应函数和偏相关分析分析结果表明当年7月最高温度是影响杜鹃灌木径向生长的关键生态因子。

(4) 滑动相关分析揭示了在全球变暖背景下,分布在贡嘎山树线上方的大叶金顶杜鹃的径向生长将会增加。大叶金顶杜鹃对气候变化极为敏感,其灌木年轮宽度年表具有明确的气候信号,具有气候重建的潜力。本研究将有助于更加全面地理解与预测气候变化对树线上方灌木生长的影响,同时也为进一步重建我国西南地区的过去气候变化历史提供基础。

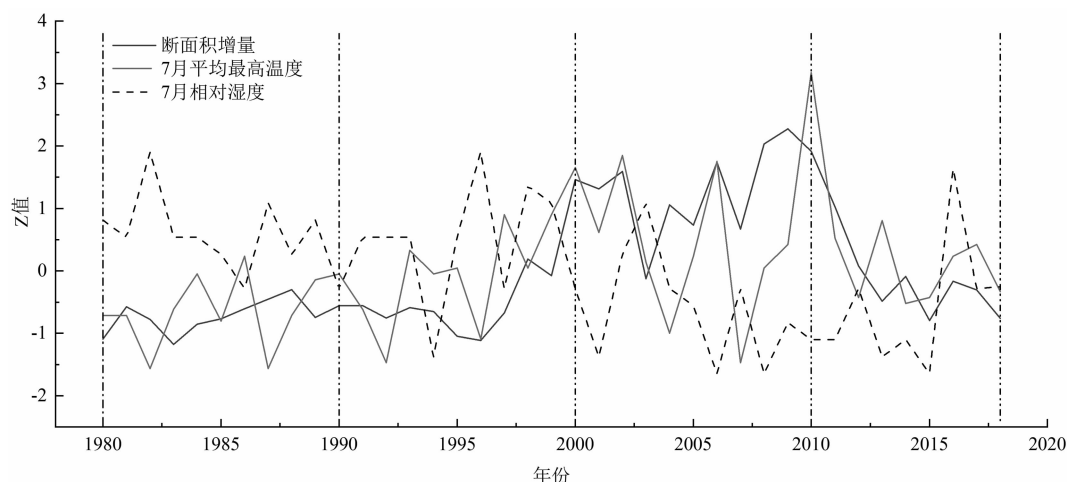


图9 大叶金顶杜鹃BAI与当年7月平均最高温度、当年7月相对湿度的变化趋势

Fig.9 *Rhododendron faberi* ring-width chronology, 1980—2018, compared with normalized maximum temperature and relatively humidity in current July



## 参考文献 (References)

- [1] GIRARDIN M P, HOGG E H, BERNIER P Y, et al. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 627–643. DOI: 10.1111/gcb.13072
- [2] CHARNEY N D, BABST F, POULTER B, et al. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth [J]. *Ecology Letters*, 2016, **19**(9): 1119–1128. DOI: 10.1111/ele.12650
- [3] LIU H Y, WILLIAMS A P, ALLEN C D, et al. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(8): 2500–2510. DOI: 10.1111/gcb.12217
- [4] WILLIAMS A P, ALLEN C D, MACALADY A K, et al. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality [J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(3): 292–297. DOI: 10.1038/NCLIMATE1693
- [5] TRANQUILLINI W, BENECKE U. Physiological ecology of the alpine timberline: Tree existence at high altitudes with special reference to the European Alps [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979. DOI: 10.1007/978-3-642-67107-4
- [6] KÖRNER C, PAULSEN J. A world-wide study of high altitude treeline temperatures [J]. *Journal of Biogeography*, 2004, **31**(5): 713–732. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x
- [7] 朱芬萌, 安树青, 关保华, 等. 生态交错带及其研究进展 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(7): 3032–3042. [ZHU Fenmeng, AN Shuqing, GUAN Baohua, et al. A review of ecotone: Concepts, attributes, theories and research advances [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(7): 3032–3042]
- [8] 李明财, 罗天祥, 朱教君, 等. 高山林线形成机理及植物相关生理生态学特性研究进展 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5583–5591. [LI Mingcai, LUO Tianxiang, ZHU Jiaojun, et al. Advances in formation mechanism of alpine timberline and associated physiological characteristics of plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(11): 5583–5591]
- [9] HOFGAARD A, HARPER K A. Tree recruitment, growth, and distribution at the circumpolar forest-tundra transition: Introduction [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, **41**(3): 435–436. DOI: 10.1139/X10-238
- [10] BATLLORI E, GUTIÉRREZ E. Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees [J]. *Journal of Ecology*, 2008, **96**(6): 1275–1288. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2008.01429.x
- [11] ROSSLER O, BRÄUNING A, LOFFLER J, et al. Dynamics and driving forces of treeline fluctuation and regeneration in Central Norway during the past decades [J]. *Erdkunde*, 2008, **62**(2): 117–128. DOI: 10.3112/erdkunde.2008.02.02
- [12] LIANG E Y, WANG Y F, ECKSTEIN D, et al. Little change in the fir tree-line position on the southeastern Tibetan Plateau after 200 years of warming [J]. *New Phytologist*, 2011, **190**(3): 760–769. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03623.x
- [13] 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. [SHANG Huaming, HONG Jianchang, ZHANG Ruibo, et al. Tree-ring recorded 522-year precipitation from previous October to May in northeastern Tibet, China [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(6): 821–832] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000378
- [14] 陈峰, 袁玉江, 喻树龙. 闽中北柳杉树轮指示的气候信号与季风区不同地域干湿变化关系 [J]. *山地学报*, 2015, **33**(6): 690–695. [CHEN Feng, YUAN Yujiang, YU Shulong. Drought signals in the tree-ring width record of Cedar (*Cryptomeria fortunei*) trees from north central Fujian: Linkages to the monsoonal regions [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(6): 690–695] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000083
- [15] COOK E R, KAIRIUKSTIS L A. Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences [M]. London: Kluwer, 1990: 51–54. DOI: 10.1007/978-94-015-7879-0
- [16] WOODCOCK H, BRADLEY R. *Salix arctica* (pall.): Its potential for dendroclimatological studies in the high arctic [J]. *Dendrochronologia*, 1994, **12**: 11–22.
- [17] BÄR A, BRÄUNING A, LÖFFLER J, et al. Dendroecology of dwarf shrubs in the high mountains of Norway: A methodological approach [J]. *Dendrochronologia*, 2006, **24**(1): 17–27. DOI: 10.1016/j.dendro.2006.05.001
- [18] BARICHIVICH J, SAUCHYN D J, LARA A, et al. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: Responses to regional and large-scale variability [J]. *Palaeogeography*, 2009, **281**: 320–333. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.033
- [19] POORE R E, LAMANNA C A, EBERSOLE J J, et al. Controls on radial growth of mountain big sagebrush and implications for climate change [J]. *Western North American Naturalist*, 2009, **69**(4): 556–562.
- [20] XIAO Shengchuan, XIAO Honglang, KOBAYASHI O, et al. Dendroclimatological investigations of sea buckthorn (*Hippophae hamnoides*) and reconstruction of the equilibrium line altitude of the July First Glacier in the western Qilian Mountains, northwestern China [J]. *Tree-Ring Research*, 2007, **63**(1): 15–26.
- [21] GRISSINO-MAYER H D. An updated list of species used in tree-ring research [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1993, **53**: 17–43.
- [22] SCHWEINGRUBER F H, POSCHLOD P. Growth rings in herbs and shrubs: Life span, age determination and stem anatomy [J]. *Forest Snow and Landscape Research*, 2005, **79**(3): 195–415.
- [23] LIANG E Y, ECKSTEIN D. Dendrochronological potential of the alpine shrub *Rhododendron nivale* on the south-eastern Tibetan Plateau [J]. *Annals of Botany*, 2009, **104**: 665–670. DOI:

- 10.1093/aob/mcp158
- [24] ETTL G J, PETERSON D L. Growth response of subalpine fir (*Abies lasiocarpa*) to climate in the Olympic Mountains, Washington, USA [J]. *Global Change Biology*, 1995, **1** (3): 213 – 230.
- [25] LIANG Eryuan, WANG Yafeng, XU Yan, et al. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees-Structure and Function*, 2010, **24**: 363 – 373. DOI: 10.1007/s00468-009-0406-0
- [26] SIDOR C G, POPA I, VLAD R, et al. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania) [J]. *Trees-Structure and Function*. 2015, **29**: 985 – 997. DOI: 10.1007/s00468-015-1178-3
- [27] CONLISK E, CASTANHA C, GERMINO M J, et al. Declines in low-elevation subalpine tree populations outpace growth in high-elevation populations with warming [J]. *Journal of Ecology*, 2017, **105**: 1347 – 1357. DOI: 10.1111/1365-2745.12750
- [28] FRITTS H C. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976: 77 – 82.
- [29] SALZER M W, HUGHES M K, BUNN A G, et al. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106** (48): 20348 – 20353. DOI: 10.1073/pnas.0903029106
- [30] PONOCNA T, SPYT B, KACZKA R, et al. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe [J]. *Trees-Structure and Function*, 2016, **30**: 1633 – 1646. DOI: 10.1007/s00468-016-1396-3
- [31] CONLISK E, CASTANHA C, GERMINO M J, et al. Declines in low-elevation subalpine tree populations outpace growth in high-elevation populations with warming [J]. *Journal of Ecology*. 2017, **105** (5): 1347 – 1357. DOI: 10.1111/1365-2745.12750
- [32] 石松林, 靳甜甜, 刘国华, 等. 气候变暖抑制西藏拉萨河大果圆柏树木生长 [J]. *生态学报*. 2018, **38** (24): 8964 – 8972. [SHI Songlin, JIN Tiantian, LIU Guohua, et al. Climate warming decelerates growth of *Sabina tibetica* in Lhasa River area of Tibet [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38** (24): 8964 – 8972] DOI: 10.5846/stxb201807131522
- [33] LIU Jingjing, QIN Chun, KANG Shuyuan. Growth response of *Sabina tibetica* to climate factors along an elevation gradient in south Tibet [J]. *Dendrochronologia*, 2013, **31** (4): 255 – 265. DOI: 10.1016/j.dendro.2012.12.001
- [34] LI Zongshan, LIU Guohua, FU Bojie, et al. The growth-ring variations of alpine shrub *Rhododendron przewalskii* reflect regional climate signals in the alpine environment of Miyaluo town in western Sichuan province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (1): 23 – 31. DOI: 10.1016/j.chnaes.2012.12.004
- [35] FANG Ruizheng, MING Tianlu. The floristic study on the genus *Rhododendron* [J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1995, **17** (4): 359 – 379.
- [36] PETERS R L, GROENENDIJK P, VLAM M, et al. Detecting long-term growth trends using tree rings: A critical evaluation of methods [J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**: 2040 – 2054. DOI: 10.1111/gcb.12826
- [37] WILLIAMS A P, ALLEN C D, MACALADY A K, et al. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality [J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**: 292 – 297. DOI: 10.1038/NCLIMATE1693
- [38] HUGHES M K, SWETNAM T W, DIAZ H F. Dendroclimatology: Progress and prospects: Volume 11 [M]. Berlin: Springer, 2011: 101 – 105. DOI: 10.1007/978-1-4020-5725-0
- [39] JUMP A S, HUNT J M, PENUELAS J. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica* [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 2163 – 2174. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x
- [40] WIGLEY T M L, BRIFFA K R, JONES P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23** (2): 201 – 213.
- [41] WANG Wenzhi, JIA Min, WANG Genxu, et al. Rapid warming forces contrasting growth trends of subalpine fir (*Abies fabri*) at higher- and lower-elevations in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, **402**: 135 – 144. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.043
- [42] ERIKSSON M. Book review of methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences edited by COOK E R and KAIRIUKSTIS L A [J]. *Forest Science*, 1991, **37** (2): 734 – 735. DOI: 10.1093/forestscience/37.2.734
- [43] FRITTS H C, DEAN J S. Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from the Chaco Canyon area, southwestern United States [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1992, **52**: 31 – 58.
- [44] LIANG Eryuan, SHAO Xuemei, QIN Ningsheng, et al. 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**: 313 – 320. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.10.008
- [45] SHI C, MASSON-DELMOTTE V, DAUX V, et al. Unprecedented recent warming rate and temperature variability over the east Tibetan Plateau inferred from Alpine treeline dendrochronology [J]. *Climate Dynamic*, 2015, **45**: 1367 – 1380. DOI: 10.1007/s00382-014-2386-z
- [46] KRONER Y, WAY D A. Carbon fluxes acclimate more strongly to elevated growth temperatures than to elevated CO<sub>2</sub> concentrations in a northern conifer [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22** (8):

- 2913–2928. DOI: 10.1111/geb.13215
- [47] KÖRNER C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation [J]. *Oecologia*, 1998, **115**: 445–459. DOI: 10.1007/s004420050540
- [48] PENG S, PIAO S, CIAIS P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on northern Hemisphere vegetation [J]. *Nature*, 2013, **501**: 88–92. DOI: 10.1038/nature12434
- [49] SIDOR C G, POPA I, VLAD R, et al. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania) [J]. *Trees*, 2015, **29**: 985–997. DOI: 10.1007/s00468-015-1178-3
- [50] 时兴合, 秦宁生, 朱海峰, 等. 青海杂多大果圆柏年轮指示的公元 1360—2005 年 5—6 月最高气温变化 [J]. *科学通报*, 2010, **55** (19): 1924–1931. [SHI Xinghe, QIN Ningsheng, ZHU Haifeng, et al. May–June mean maximum temperature change during 1360—2005 as reconstructed by tree of *Sabina tibetica* in Zaduo, Qinghai province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55** (19): 1924–1931] DOI: 10.1007/s11434-010-3237-x
- [51] DUAN Jianping, ZHANG Qibin, LYU Lixin, et al. Regional-scale winter spring temperature variability and chilling damage dynamics over the past two centuries in southeastern China [J]. *Climate Dynamics*, 2012, **39**: 919–928. DOI: 10.1007/s00382-011-1232-9
- [52] ZHU H F, FANG X Q, SHAO X M, et al. Tree ring-based February-April temperature reconstruction for Changbai Mountain in northeast China and its implication for east Asian winter monsoon [J]. *Climate of the Past*, 2009, **5**: 661–666. DOI: 10.5194/cp-5-661-2009
- [53] TAKAHASHI K, TOKUMITSU Y, YASUE K, et al. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan [J]. *Ecological Research*, 2005, **20** (4): 445–451. DOI: 10.1007/s11284-005-0060-y
- [54] 吴普, 王丽丽, 邵雪梅. 采用高山松最大密度重建川西高原近百年夏季气温 [J]. *地理学报*, 2005, **60** (6): 998–1006. [WU Pu, WANG Lily, SHAO Xuemei. Reconstruction of summer temperature from maximum latewood density of *Pinus densata* in west Sichuan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60** (6): 998–1006]
- [55] LIU Y, AN Z, LINDERHOLM H W, et al. Annual temperatures during the last 2485 years in the mid-eastern Tibetan Plateau inferred from tree rings [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52** (3): 348–359. DOI: 10.1007/s11430-009-0025-z
- [56] FRITTS H C. *Tree rings and climate* [M]. London: Academic Press, 1976: 376–412, 534.
- [57] LIANG E Y, LEUSCHNER C, DULAMSUREN C, et al. Global warming-related tree growth decline and mortality on the north-eastern Tibetan plateau [J]. *Climatic Change*, 2016, **134**: 163–176. DOI: 10.1007/s10584-015-1531-y

## Response of Radical Growth of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* to Climate Change above Treeline in the Gongga Mountain, China

JIA Longyu<sup>1a,1b</sup>, GUAN Zengyan<sup>1a,1b</sup>, CHANG Ruiying<sup>2</sup>, SHI Songlin<sup>1a,1b\*</sup>, PENG Peihao<sup>1a,1b</sup>

(1. a. College of Tourism and Urban-Rural Planning; b. Ecological Resources and Landscape Architecture Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Mountain hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Global warming have a significant effect on shrub growth above treelines, whereas its response to climate change still remains unclear. In order to determine shrub radial growth trends and explore its responses to climate, standard dendrochronological procedures were performed using tree-ring materials of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* (RF) collected above alpine treelines in Gongga Mountain. Three detrending strategies, including conservative detrending (CD), regional curve standardization (RCS) and basal area index (BAI) were used to remove age-related growth trends and construct standardized RF ring-width chronologies. Pearson correlation coefficients, partial and moving correlation analyses were conducted to research the connection of the RF radial growth and climate variabilities. We conclude that: (1) The area of radial growth enhancement was most significant

for BAI chronology as suggested by Mann-Kendall trend test. (2) Pearson correlation analysis suggested that the radial growth of *RF* was significantly and positively correlated with July maximum temperature and mean September temperature of the previous year, both mean and maximum temperature in July and September of the current year. The radial growth of *RF* was significantly and negatively associated with relative humidity in June, July, and September of both the previous and current year. The radial growth of *RF* was also negatively correlated with the relative humidity of June, July and September in both the previous and current year. Climatic response at seasonal scale was explored, which suggested that BAI chronology was significantly and positively associated with July-November mean temperature of the previous year, July-September mean temperature and April-September maximum temperature of the current year. (3) The response function and partial correlations suggested that the July maximum temperature of the current year was the key factor dominating the *RF* radial growth in Gongga Mountain. (4) The moving correlation analysis implied the *RF* above treeline in Gongga Mountain increased with climate warming. This study could contribute to understand and predict the climatic response of shrub growth above treelines.

**Key words:** climate change; radial growth; *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii*; dendroecology; the Gongga Mountain