

DOI: 10.5846/stxb201905171019

曹仁杰, 尹定财, 田昆, 肖德荣, 李志军, 张绪岗, 李泽辉, 张贇. 丽江老君山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(17): 6067-6076.

Cao R J, Yin D C, Tian K, Xiao D R, Li Z J, Zhang X G, Li Z H, Zhang Y. Response of radial growth of *Abies georgei* and *Tsuga dumosa* to climate change at upper distributional limits on Laojun Mountain, Lijiang, Yunnan, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6067-6076.

## 丽江老君山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)径向生长对气候变化的响应

曹仁杰<sup>1</sup>, 尹定财<sup>1</sup>, 田 昆<sup>1</sup>, 肖德荣<sup>1</sup>, 李志军<sup>2</sup>, 张绪岗<sup>2</sup>, 李泽辉<sup>2</sup>, 张 贇<sup>1,\*</sup>

1 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 昆明 650224

2 大理剑川剑湖湿地省级自然保护区管护局, 剑川 671300

**摘要:** 基于树木年轮学方法, 利用丽江老君山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)和云南铁杉(*Tsuga dumosa*)树轮宽度资料, 构建差值年表, 运用响应函数和滑动响应分析研究树木径向生长与气温和降水的相关关系及其稳定性, 进而阐明影响该区域 2 个针叶树种径向生长的主要气候要素。结果表明: 2 个树种对降水累积效应的响应较为一致, 对逐月气候因子的响应存在差异, 相关关系较为稳定, 具体表现为(1) 上年 11 月平均温升高和当年生长季盛期(7—8 月)降水增加有利于老君山海拔上限长苞冷杉生长; (2) 云南铁杉径向生长与当年 3 月、树木休眠期(1—3 月)、生长季盛期(7—8 月)的降水表现为显著正相关关系, 与上年 7 月与当年 5 月的气温及当年生长季末期(9—10 月)降水呈显著负相关; (3) 上述相关关系的稳定性较强, 在全部或大部分分析时段(1951—2017)内达到显著相关, 云南铁杉的稳定性更强。研究结果可为气候变化背景下滇西北高原树木生长的管理及森林生态系统的保护提供理论依据。

**关键词:** 树木年轮; 气候响应; 海拔上限; 滇西北高原

### Response of radial growth of *Abies georgei* and *Tsuga dumosa* to climate change at upper distributional limits on Laojun Mountain, Lijiang, Yunnan, China

CAO Renjie<sup>1</sup>, YIN Dingcai<sup>1</sup>, TIAN Kun<sup>1</sup>, XIAO Derong<sup>1</sup>, LI Zhijun<sup>2</sup>, ZHANG Xugang<sup>2</sup>, LI Zehui<sup>2</sup>, ZHANG Yun<sup>1,\*</sup>

1 National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Dali Jianchuan Jianhu Wetland Provincial Nature Reserve, Jianchuan 671300, China

**Abstract:** Based on the dendrochronological method, tree width data of *Abies georgei* and *Tsuga dumosa* at their upper distributional limit in Laojun Mountain were used to develop tree-ring residual chronologies. In order to clarify the main climatic factors affecting the radial growth of two conifer species, we used response function and moving interval analysis to study relationships between chronologies and temperature and precipitation, and the stability of the relationships. The results showed that the response of the two tree species was consistent in cumulative effects of precipitation, but different in monthly climatic factors, and the relationships were stable. The detail results were as follows: (1) November mean temperature in last year and growing season (July—August) precipitation in current year promoted the radial growth of *A. georgei* at the upper distributional limit. (2) The radial growth of *T. dumosa* was significantly and positively correlated with the precipitation in March, the dormant period (January—March) and growing season of current year, but the growth was

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31600395); 云南省高原湿地科学创新团队项目(2012HC007)

**收稿日期:** 2019-05-17; **修订日期:** 2020-03-18

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

significantly and negatively correlated with July temperature in last year, May temperature and post-growing season (September—October) precipitation in current year. (3) The relationships between radial growth and climatic factors were stable by presenting significant correlations in most or whole analysis periods (1951—2017), and the stability of *T. dumosa* was stronger than *A. georgei*. The result of this paper can provide a theoretical basis for the prediction of tree growth and the management and protection of forest ecosystems in the northwestern Yunnan Plateau under the background of climate change.

**Key Words:** tree-ring; climate response; the upper distributional limit; Northwestern Yunnan Plateau

气候变化已经从局地、区域和全球等不同空间尺度上影响着树木生长<sup>[1-4]</sup>。树木生长受遗传和环境因子的共同影响,是多种生态因子共同作用的结果,运用树木年轮学方法剔除树种原生遗传因子和生长趋势等非气候因子影响后,年轮宽度指数将保留对应年份的气候信息<sup>[5]</sup>,因此树木年轮已广泛应用于树木生长对气候变化的响应研究<sup>[6-8]</sup>和古气候的重建<sup>[5]</sup>。

海拔上限的自然环境恶劣,是树木垂直分布的界限。因而该区域树木生长对环境变化敏感,以往研究结果表明气温是影响海拔上限树木径向生长的主要气候因子<sup>[9-10]</sup>,但受地区限制因子差异及局地环境影响,这一规律存在局限性。例如:刘敏等发现影响长白山自然保护区内高海拔红松(*Pinus koraiensis*)径向生长的主要气候因子是当年生长季帕尔默干旱指数和降水<sup>[11]</sup>。曹宗英等发现祁连山中段海拔上限青海云杉(*Picea crassifolia*)径向生长受降水和气温共同影响<sup>[12]</sup>。宋文琦等发现影响青藏高原都兰地区高海拔祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)主要受降水的影响<sup>[13]</sup>。杨绕琼等发现玉龙雪山高海拔限制云南松(*Pinus yunnanensis*)径向生长的主要气候因子为夏季降水<sup>[14]</sup>。因而海拔上限树木径向生长和气候因子关系的研究,有助于揭示不同地区树木生长对气候变化的响应规律。

滇西北高原地处青藏高原东南缘,生物多样性丰富<sup>[15]</sup>,是典型的气候敏感区,适合开展树木年轮学研究,前人已白马雪山、石卡雪山、普达措国家公园、哈巴雪山、玉龙雪山等地开展了较多海拔上限的树轮研究工作。Fan 等发现白马雪山海拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)径向生长主要受夏季气温影响<sup>[16]</sup>。张贇等发现石卡雪山海拔上限长苞冷杉径向生长仅受7月气温影响,高山松(*Pinus densata*)径向生长受上年10月平均温影响<sup>[17-18]</sup>,普达措国家公园海拔上限长苞冷杉与丽江云杉(*Picea likiangensis*)径向生长仅受气温影响<sup>[19]</sup>,哈巴雪山海拔上限长苞冷杉径向生长主要受上年11月气温和当年9月降水的影响,大果红杉(*Larix potaninii*)受当年9月降水的影响<sup>[20]</sup>,玉龙雪山海拔上限处长苞冷杉与丽江云杉受气温和降水的共同影响<sup>[21]</sup>。

上述研究表明,滇西北高原海拔上限树木生长对气候的响应存在差异,这种差异既表现在不同地区的同一树种,也存在于同一地区的不同树种。在由北至南的纬度梯度上,由单一气温影响转变为气温与降水共同作用。老君山是滇西北高原南部生态系统保存完好的一座典型高山,该地区已开展表层土壤花粉与植被关系研究<sup>[22]</sup>、植物景观资源开发与保护研究<sup>[23]</sup>,但对于树木径向生长和环境因子关系的相关研究较少。长苞冷杉与云南铁杉(*Tsuga dumosa*)是丽江老君山的主要树种<sup>[22]</sup>,也是滇西北亚高山森林的主要组成。长苞冷杉耐荫寒、喜湿润,云南铁杉喜温凉、不耐旱<sup>[24]</sup>。对生物学习性不同的树种开展树木年轮研究,更有助于揭示影响该地区树木生长的关键气候因子及其响应机制。

本文以老君山为研究地点,选取长苞冷杉和云南铁杉为研究对象,根据树木年轮学方法建立2个树种海拔上限的树轮差值年表,通过相关分析研究其对气温和降水的响应特征及其稳定性,从而阐明影响老君山2个树种径向生长的关键气候要素,为老君山树木生长管理和森林保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

老君山位于玉龙纳西族自治县、剑川县与兰坪白族普米族自治县等交界处,地理坐标介于26°38'—

27°15'N, 99°07'—100°00'E 之间(图 1), 海拔 2100—4515 m, 总面积约为 1324 km<sup>2</sup>[22]。其地处滇西北高原山系南段云岭主脉中支纵谷区、世界自然遗产“三江并流”带的南端。区内植物区系地理成分复杂, 植物种类丰富, 森林类型多样, 是滇西北高原生物多样性热点地区的腹地, 也是中国原生生态系统保存最为完好和全球最具代表性的生态系统之一[25]。

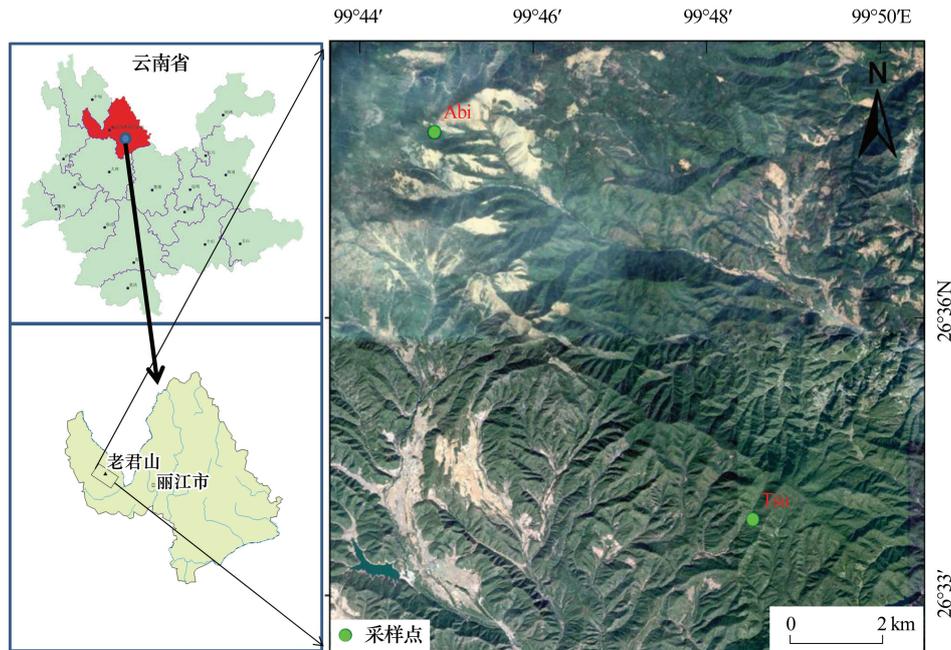


图 1 研究区域位置

Fig.1 Location of study area in the Laojun Mountain of Lijiang, Yunnan

Abi: 长苞冷杉, *Abies georgei*; Tsu: 云南铁杉, *Tsuga dumosa*

老君山植被垂直地带性显著, 依次为落叶阔叶林、针阔混交林、常绿阔叶林、亚高山针叶林[22]。云南铁杉生长在海拔 2500—3500 m 的针阔混交林[23], 长苞冷杉生长在海拔 3000—4000 m 的亚高山针叶林[22]。

研究区气候受印度洋西南季风、太平洋东南季风和青藏高原气团的交错影响。根据云南丽江气象站(26.87°N, 100.22°E, 海拔 2393 m) 1951—2017 年气象资料显示, 区域年平均温 12.75°C, 最热月 6 月平均温 18.17°C, 最冷月 1 月平均温 6.10°C。区域年平均降水量 964.68 mm, 季节分布不均, 主要集中于 6—9 月, 占全年降水的 80.82%(图 2)。

## 1.2 样品采集与年表建立

2018 年 6 月, 在老君山 2 个树种的海拔上限分别设立样点开展年轮采集工作。样点设置在未受人为干扰的森林群落, 用生长锥在每棵树胸高位置(距离地面 1.3 m 处)采集树芯, 即沿山坡平行方向钻取 2 个样芯, 装入事先准备好的塑料管内, 对同一颗树的 2 棵样芯配对打包并标记, 分别取样 28 棵长苞冷杉和 32 棵云南铁杉(表 1)。

表 1 采样点概况

Table 1 Description of sampling sites

树种 Species	采样时间 Sampling date	海拔/m Altitude/m	经度/E Longitude/E	纬度/N Latitude/N	样本量(树/样芯) No. (tree/core)
长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	2018.06	3810	99°44'	26°38'	28/53
云南铁杉 <i>Tsuga dumosa</i>	2018.06	3502	99°48'	26°33'	32/62

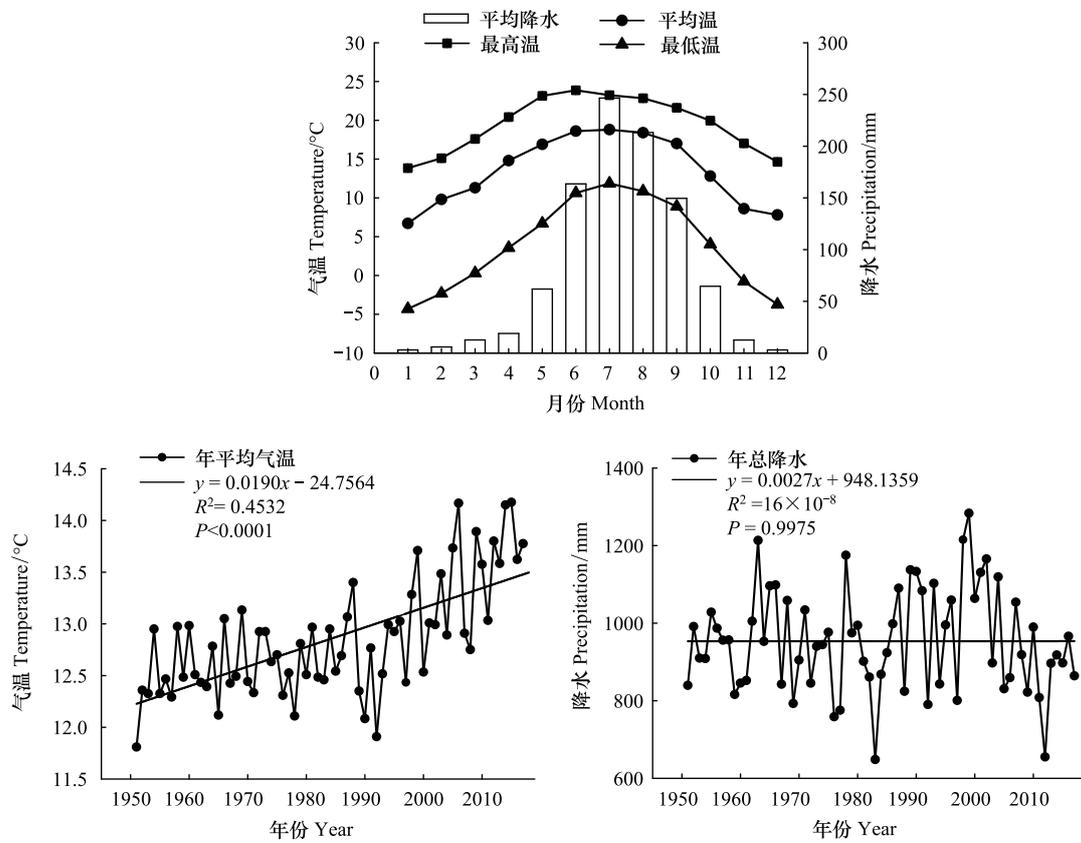


图2 云南丽江气象站气象资料(1951—2017)

Fig.2 Climate date from Yunnan Lijiang Meteorological Station (1951—2017)

将样本带回实验室,从塑料管内取出树芯,并用白乳胶固定在定制的木槽内,待其自然风干后,依次用由粗到细的砂纸对树芯进行打磨,直到用肉眼可以清晰分辨出年轮。先将样芯放在双筒显微镜下进行目视定年,后置于 EPSON Scan (Espression11000XL) 扫描仪中进行扫描并对样芯编号,扫描仪参数设定为专业模式图像类型 24 位全彩,分辨率为 3200 dpi,扫描后的图像利用 CDendro and Coorecorer ver 7.3<sup>[26]</sup> 软件测量年轮宽度,精度为 0.001 mm。进一步用 COFECHA 程序<sup>[27]</sup> 将测量结果进行检验,剔除断裂、破损等质量较差的样本,最终保留 50 根长苞冷杉和 61 根云南铁杉树芯进入主序列。

运用 ARSTAN 程序建立年表,拟合采用步长为样本长度 67% 的样条函数,去除树木本身个体差异的影响(例如遗传因子和干扰竞争)。最终建立了丽江老君山长苞冷杉和云南铁杉的标准年表(STD),差值年表(RES,图3)和自回归年表(ARS)。通过对比统计特征值,确定本研究采用拥有更多高频信息的差值年表<sup>[28]</sup>,并与主要气候要素(气温和降水)进行相关分析。

### 1.3 气象资料的获取

在中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)获取距离老君山最近的丽江气象站(26.87°N, 100.22°E,海拔 2393 m,直线距离 95 km 左右)的气候信息,资料时段为 1951—2017 年,包括月平均气温和月平均降水。根据以往该区域树木年轮学研究成果 Panthi 等<sup>[24]</sup>、Liang 等<sup>[29]</sup>、Fan 等<sup>[30]</sup>、徐宁等<sup>[31]</sup>,气象站数据能够较好的应用于海拔梯度上树木生长对气候变化的响应研究,本文亦利用丽江气象站数据进行老君山长苞冷杉和云南铁杉与气候因子的相关分析,选用气温和降水 2 个气候指标分析与年表的相关性。

### 1.4 数据分析

因为气候对树木生长具有滞后效应<sup>[32]</sup>,所以本次研究选取上年 7 月至当年 10 月的平均气温和降水与 2 个树种的差值年表进行逐月响应分析,同时研究树木不同生长季(1—3 月为树木休眠期,4—6 月为生长季

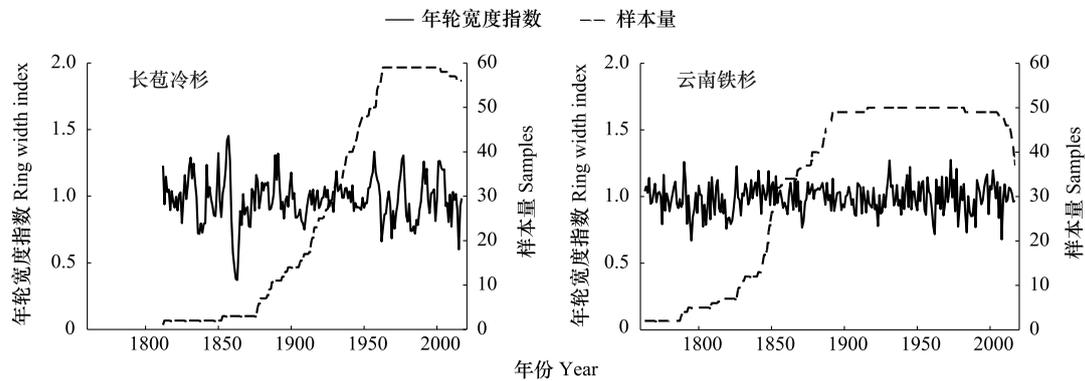


图3 树轮宽度差值年表

Fig.3 Residual tree-ring chronology

早期,7—8月为树木生长季盛期,9—10月为树木生长季末期)对气温和降水的响应。响应函数对气候要素先提取主成分再进行回归分析,能够更加准确的反映出样本数据受环境因子的影响程度,分析软件选用 DendroClim2002 软件完成。同时运用 DendroClim2002 中的 Evolutionary and Moving Response and Correlation 模块,窗口年限选择 32 年,分别选向前和向后滑动,分析两个树种径向生长与气温和降水的动态关系,以确定树木径向生长与气候要素响应关系间的稳定性。绘图由 SigmaPlot 10.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 年表的统计特征

长苞冷杉和云南铁杉年表统计参数及公共区间所示(表 2),建立的长苞冷杉和云南铁杉差值年表均对 2 个气候要素具有较高敏感性,公共区间(1951—2017 年)统计量中平均敏感度分别为 0.13 和 0.14,信噪比为 12.39%和 20.38%,第一主成分的方差解释量为 31.72%和 34.75%,样本总体代表性为 0.93 和 0.95(都高于 0.85),表明建立的长苞冷杉和云南铁杉的差值年表质量较好,适合用于与气候要素的分析。

表 2 年表统计参数及公共区间分析

Table 2 Statistics of ring-width chronologies and common interval analysis

统计特征 Statistic characters	长苞冷杉 <i>Abies georgei</i>	云南铁杉 <i>Tsuga dumosa</i>
样本量(树/样芯) No.(tree/core)	28/50	32/61
序列长度 Time span/A.D	1761—2017	1812—2017
EPS>0.85 起始年样芯数 Year since EPS>0.85/cores	1845/17	1896/13
平均敏感度 Mean sensitivity	0.13	0.14
公共区间(1951—2017 年)统计量 Common interval analysis(1951—2017)		
标准差 Standard deviation	0.11	0.12
信噪比 Signal-to-noise ratio	12.39%	20.38%
样本总体代表性 Expressed population signal	0.93	0.95
第一主成分方差解释量 Variance in first eigenvector/%	31.72%	34.75%

### 2.2 径向生长对气候要素的响应

长苞冷杉和云南铁杉差值年表与逐月气温和降水的响应分析结果表明(图 4),长苞冷杉径向生长与上年 11 月平均气温呈显著正相关,云南铁杉径向生长与上年 7 月、当年 5 月气温呈显著负相关,与当年 3 月降水呈显著正相关。

与生长季气候要素的响应分析结果表明,长苞冷杉径向生长与当年生长季盛期降水呈显著正相关,云南

铁杉径向生长与当年休眠期、生长季盛期、生长季末期降水表现出显著相关关系,当年休眠期和生长季盛期降水促进其生长,当年生长季末期降水则抑制生长。

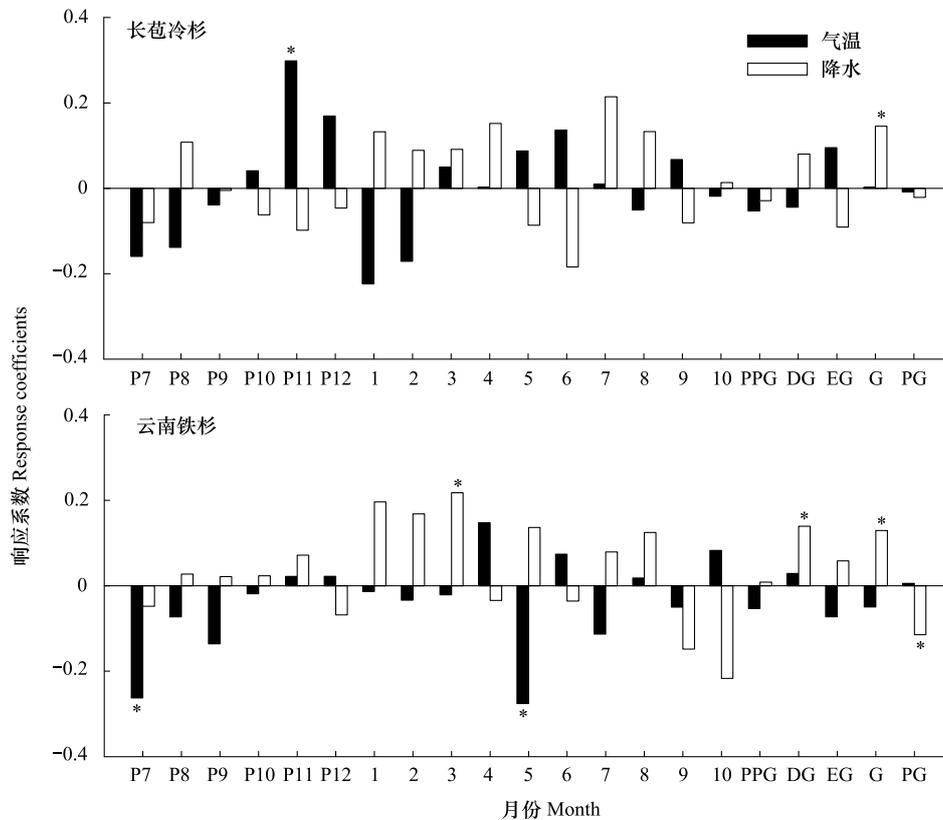


图4 差值年表与气候因子的相关关系

Fig.4 Relationships between residual chronologies and climatic factors

P: 上年; \*: 达到 0.05 水平的显著相关; PPG: 上年生长季末期, previous post-growing season; DG: 休眠期, dormant growing season; EG: 生长季前期, early growing season; G: 生长季盛期, growing season; PG: 生长季末期, post-growing season

### 2.3 径向生长与气候要素的动态关系

滑动分析结果表明,海拔上限处长苞冷杉径向生长与上年 11 月气温、当年生长季盛期降水的响应关系稳定,在分析时段内均达到显著正相关。长苞冷杉对当年生长季盛期降水的稳定性有明显的上升趋势,响应系数从 1951 年的 0.135 上升至 2017 年的 0.339。云南铁杉径向生长与休眠期和生长季末期降水有非常强的稳定性,分析时段内均达到显著正相关。与休眠期降水的显著正相关呈下降趋势(响应系数从 1951 年的 0.278 降至 2017 年的 0.129);与生长季末期降水的显著负相关关系加强(响应系数从 1951 年的 -0.127 降至 2017 年的 -0.184);与上年 7 月气温、当年 5 月的气温、生长期降水的稳定性较强,在大部分的时间内达到显著相关;与当年 3 月降水的稳定性相对较弱,在部分时间段内达到显著正相关(图 5)。

## 3 讨论

### 3.1 2 个树种径向生长对气候响应的共性

2 个树种径向生长都与当年生长季盛期降水呈显著正相关关系,这是因为夏季是树木生长的旺季,生长季充足的降水能够保证夏季土壤具有良好的水分状况,有利于树木进行光合作用并提供生长所需的有机物<sup>[33]</sup>。生长季降水量与树木径向生长通常呈正相关<sup>[34]</sup>,较高的含水量为植物组织提供较好的生理代谢环境<sup>[35]</sup>。在邻近区域川西亚高山森林岷江冷杉(*Abies faxoniana*)的树木年轮学研究中也有相似结果<sup>[36]</sup>。

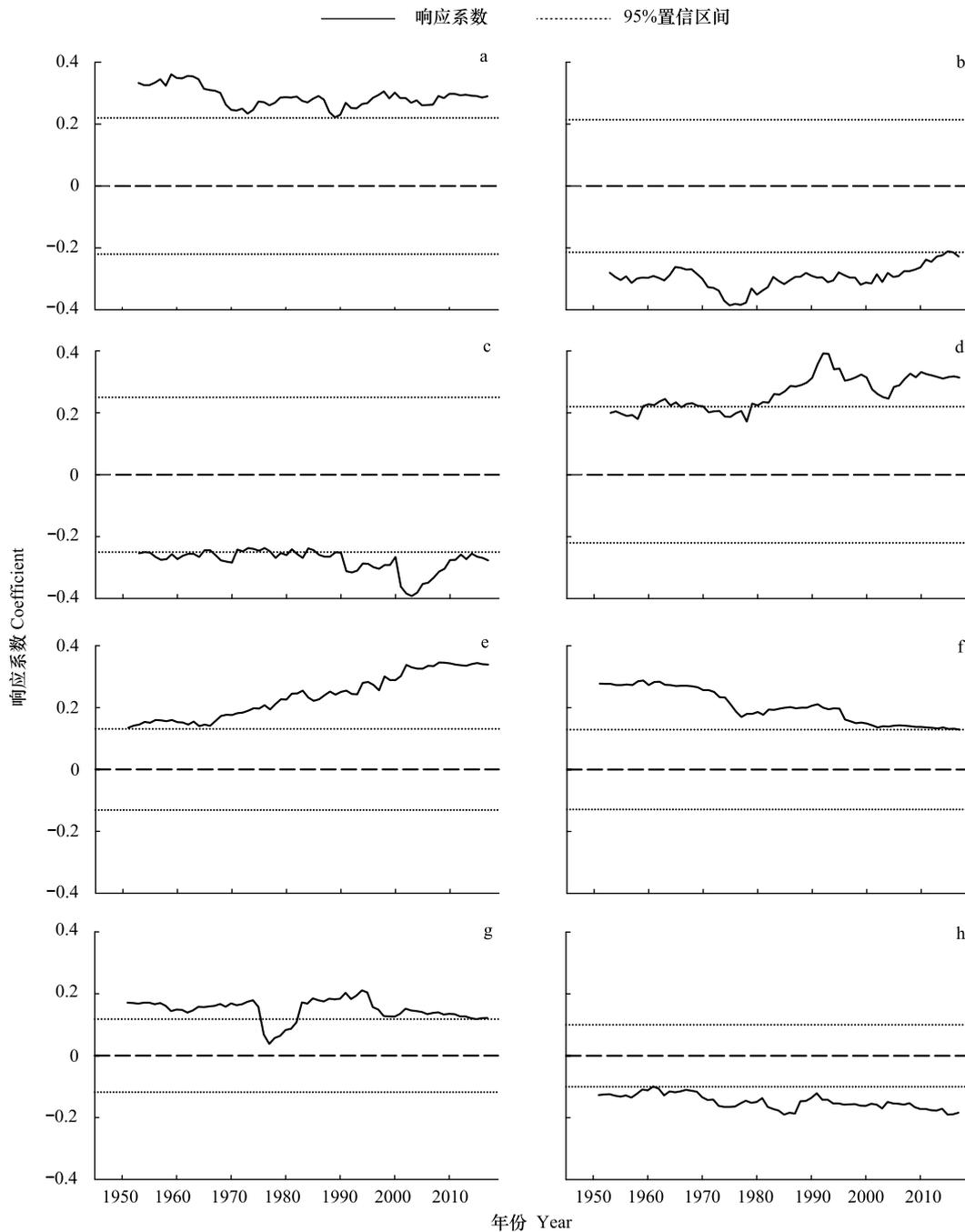


图5 树轮宽度差值年表与气候要素的滑动响应分析

Fig.5 Moving interval response analysis between the residual chronologies and climatic factors

a:长苞冷杉与上年11月气温;b:云南铁杉与上年7月气温;c:云南铁杉与当年5月气温;d:云南铁杉与当年3月降水;e:长苞冷杉与生长季盛期降水;f:云南铁杉与休眠期降水;g:云南铁杉与生长季盛期降水;h:云南铁杉与生长季末期降水

当年休眠期降水的增加有利于长苞冷杉和云南铁杉径向生长,这种作用在云南铁杉上更为突出(在3月及1—3月都表现出显著性)。老君山1—3月降水以降雪为主,降雪多积雪厚,可形成保温层,客观上保护了树木根系,有利于树木度过冻害期,并在气温回暖后更好的生长<sup>[37]</sup>。另一方面积雪融化后会给树木生长季前期提供充足的水分储备<sup>[38]</sup>,在相邻的玉龙雪山不同海拔云南铁杉、长苞冷杉与丽江云杉<sup>[29,39]</sup>、香格里拉普达措海拔上限大果红杉<sup>[20]</sup>、川西王朗自然保护区的岷江冷杉树轮研究中有类似发现<sup>[21,40]</sup>,说明冬季降雪在

该区域树木生长中的重要保护作用。另外,在日本中部亚高山林线<sup>[41]</sup>、美国北卡斯克德山脉的亚高山针叶林<sup>[42]</sup>、欧洲奥地利高山树线<sup>[43]</sup>也有同样结论,表明冬季降雪是海拔上限树木生长的重要影响因子。

2个树种还与当年生长季末期降水呈负相关关系(其中云南铁杉表现出显著性),生长季末期气温下降速度快,降雨常常伴随着低温且云量增大,导致太阳辐射减弱,降低树木的光合作用速率,有机物产量减少,不利于树木径向生长<sup>[16]</sup>。相似结果在其他冷杉属植物及相邻地区的树轮研究中有所报道,例如西藏林芝的喜马拉雅冷杉(*Abies pindrow*)<sup>[44]</sup>、神农架的巴山冷杉(*Abies fargesii*)<sup>[45]</sup>、哈巴雪山的大果红杉<sup>[20]</sup>、王朗自然保护区的紫果云杉(*Picea purpurea*)<sup>[46]</sup>等研究中有同样结论。

### 3.2 2个树种径向生长对气候响应的差异

长苞冷杉表现出与上年11月平均气温的显著正相关,这可能与上年生长季末期气温升高增强光合作用速率有关<sup>[47]</sup>。丽江11月的气温较低,树木已基本停止生长,但仍有较弱的生理活动,此时的高温能够提高长苞冷杉光合作用速率,促进有机物质的合成与储存,为下年的树木生长创造有利条件<sup>[19]</sup>。11月的高温客观上延长了长苞冷杉的生长季,使其有更多的时间贮存养分,以供来年生长<sup>[21]</sup>。在相邻白马雪山的长苞冷杉<sup>[29]</sup>、石卡雪山的高山松<sup>[48]</sup>、川西亚高山岷江冷杉<sup>[36]</sup>都有同样结论,说明上年11月平均气温是影响老君山海拔上限长苞冷杉径向生长的关键气候要素。

云南铁杉表现出与上年7月、当年5月气温的显著负相关,7月气温升高在促进光合作用的同时,也消耗了大量有机物,不利于营养物积累<sup>[49]</sup>,从而影响来年生长季初期云南铁杉的生长。与当年5月气温的显著负相关,表明当年生长季前期气温升高不利于云南铁杉的径向生长。在一些水分受到限制的区域,生长季前期的气温升高将会增强植物的蒸散作用,降低水分可利用性,形成水分胁迫,从而限制树木生长<sup>[50]</sup>,甚至增加树木的死亡率<sup>[51]</sup>。老君山5月气温高,降水相对较少,增加了蒸发速率,造成干旱,因此树木径向生长受到影响。这与相邻玉龙雪山云南铁杉<sup>[52]</sup>以及川西喜马拉雅罗林区南方铁杉(*Tsuga chinensis*)<sup>[53]</sup>的树轮学研究结果一致,说明铁杉容易受春季干旱的不利影响。

### 3.3 2个树种径向生长与气候要素的稳定性分析

总体而言,2个树种与气候因子关系的稳定性较强,在全部或大部分分析时段内能达到显著相关,说明2个树种对气候变化较为敏感,是树木年轮学研究的适宜树种。同时,短期气候变化也会对树木生长产生影响,例如:1951年以来生长季盛期降水的增加促进了长苞冷杉生长,尤其是1967—2002年降水显著增加时期(图6),相关系数数值上升趋势更为明显。而1992—2012年时间段内,休眠期降水的持续下降(图6)减弱了其云南铁杉的显著正相关关系。

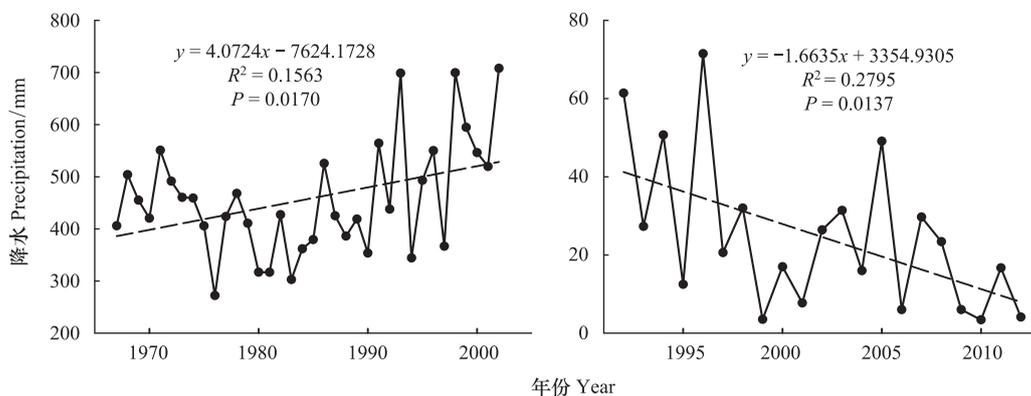


图6 与稳定性相关的气候数据

Fig.6 Climate data related to stability

## 4 结论

老君山海拔上限长苞冷杉和云南铁杉的径向生长受上年和当年的气温和降水共同影响,这与高海拔树木生长主要受气温影响的传统认识不同,因而可为不同地区高海拔树木生长与气候因子关系研究提供参考。2 个树种对降水累积效应的响应共性较好,逐月气候因子的响应差异明显,表明 2 个树种树轮年表中既包含了共同气候信息,也因树种生物学习性不同存在生长响应差异。云南铁杉对气候变化更为敏感(显著相关的气候因子更多)且相关关系的稳定性较强,说明老君山云南铁杉径向生长能够反映出更多的气候信息。本研究是对滇西北高原树轮研究的有利补充,可为区域内针叶树种生长应对气候变化提供科学依据,也为高海拔地区不同树种径向生长对气候响应差异的研究提供参考。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Girardin M P, Hogg E H, Bernier P Y, Kurz W A, Guo X J, Cyr G. Negative impacts of high temperatures on growth of black spruce forests intensify with the anticipated climate warming. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 627-643.
- [ 2 ] Charney N D, Babst F, Poulter B, Record S, Trouet V M, Frank D, Enquist B J, Evans M E K. Observed forest sensitivity to climate implies large changes in 21st century North American forest growth. *Ecology Letters*, 2016, 19(9): 1119-1128.
- [ 3 ] Liu H Y, Williams A P, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [ 4 ] Williams A P, Allen C D, Macalady A K, Griffin D, Woodhouse C A, Meko D M, Swetnam T W, Rauscher S A, Seager R, Grissino-Mayer H D, Dean J S, Cook E R, Gangogadamage C, Cai M, McDowell N G. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 292-297.
- [ 5 ] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 孙涛, 李兴欢, 黄唯, 刘瑞鹏, 李元昊. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1341-1352.
- [ 6 ] George S S. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 132-150.
- [ 7 ] Wilking M, Juday G P, Barber V, Zald H S J. Recent climate warming forces contrasting growth responses of white spruce at treeline in Alaska through temperature thresholds. *Global Change Biology*, 2004, 10(10): 1724-1736.
- [ 8 ] Borgeankar H P, Sikder A B, Ram S. High altitude forest sensitivity to the recent warming: A tree-ring analysis of conifers from Western Himalaya, India. *Quaternary International*, 2011, 236(1/2): 158-166.
- [ 9 ] Yu D P, Wang G G, Dai L M, Wang Q L. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1/3): 105-113.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 夏志宇. 不同径级红松径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3530-3540.
- [ 12 ] 曹宗英, 勾晓华, 刘文火, 高琳琳, 张芬. 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. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(7): 29-34.
- [ 13 ] 宋文琦, 朱良军, 张旭, 王晓春, 张远东. 青藏高原东北部不同降水梯度下高山林线祁连圆柏径向生长与气候关系的比较. *植物生态学报*, 2018, 42(1): 66-77.
- [ 14 ] 杨绕琼, 范泽鑫, 李宗善, 温庆忠. 滇西北玉龙雪山不同海拔云南松 (*Pinus yunnanensis*) 径向生长对气候因子的响应. *生态学报*, 2018, 38(24): 8983-8991.
- [ 15 ] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, Da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [ 16 ] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F, Zhu S D. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 306-313.
- [ 17 ] 毕迎风. 滇西北地区五种植物径向生长与气候变化的研究——兼论铁杉空间分布模拟[D]. 昆明: 中国科学院大学, 2013.
- [ 18 ] Zhang Y, Yin D C, Sun M, Wang H, Tian K, Xiao D R, Zhang W G. Variations of climate-growth response of major conifers at upper distributional limits in Shika Snow Mountain, northwestern Yunnan Plateau, China. *Forests*, 2017, 8(10): 337.
- [ 19 ] 张贇, 尹定财, 张卫国, 岳海涛, 杜杰次丹, 李秋平, 杨荣, 田昆. 普达措国家公园 2 个针叶树种径向生长对温度和降水的响应. *生态学报*, 2018, 38(15): 5383-5392.
- [ 20 ] 张贇, 尹定财, 田昆, 肖德荣, 孙梅, 王行, 张卫国. 滇西北海拔上限大果红杉径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2805-2812.
- [ 21 ] 张贇, 尹定财, 田昆, 和荣华, 和茂珍, 李玉春, 孙大成, 张卫国. 玉龙雪山东坡不同海拔长苞冷杉径向生长与气候因子的关系. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2355-2361.
- [ 22 ] 李永飞, 贺杰, 李春海, 许斌, 谢贤健. 云南丽江老君山表土花粉与植被关系的研究. *微体古生物学报*, 2018, 35(1): 51-64.

- [23] 杨桂芳, 郑鹏, 和继光. 丽江老君山国家公园植物景观资源的开发与保护. 林业调查规划, 2014, 39(5): 36-39.
- [24] Panthi S, Bräuning A, Zhou Z K, Fan Z X. Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Dendrochronologia*, 2018, 47: 1-9.
- [25] 余艳红. 景观格局指数在生态环境影响评价中的应用——以丽江至香格里拉铁路生态影响评价为例. 环境科学导刊, 2010, 29(2): 82-85, 108-108.
- [26] <https://www.cybis.se/cbeewing/CRecorder/handbok.htm>
- [27] L HR. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43(1): 69-75.
- [28] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 1994(02): 174-181.
- [29] Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, Liu B M, Shao X M. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 2010, 24(2): 363-373.
- [30] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F. Annual temperature reconstruction in the central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 97-107.
- [31] 徐宁, 王晓春, 张远东, 刘世荣. 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. 生态学报, 2013, 33(12): 3742-3751.
- [32] 赵志江, 谭留夷, 康东伟, 刘琪璟, 李俊清. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2012, 23(3): 603-609.
- [33] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the internal Alps. *Tree—Ring Society*, 1993, 53: 1-11.
- [34] Gervais B R. A three—century record of precipitation and blue oak recruitment from the Tehachapi Mountains, Southern California, USA. *Dendrochronologia*, 2006, 24(1): 29-37.
- [35] 赖志华. 长苞铁杉幼苗对极端温度和外源钙的适应与响应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [36] 赵志江. 川西亚高山岷江冷杉与紫果云杉对气候的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [37] Zhang Y, Bergeron Y, Zhao H X, Drobyshv I. Stand history is more important than climate in controlling red maple (*Acer rubrum* L.) growth at its northern distribution limit in western Quebec, Canada. *Journal of Plant Ecology*, 2015, 8(4): 368-379.
- [38] Vaganov E A, Hughes M K, Kirilyanov A V, Schweingruber F H, Silkin P P. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 1999, 400(6740): 149-151.
- [39] 张贇, 尹定财, 田昆, 张卫国, 和荣华, 和文清, 孙江梅, 刘振亚. 玉龙雪山不同海拔丽江云杉径向生长对气候变异的响应. 植物生态学报, 2018, 42(6): 629-639.
- [40] Zhao Z J, Eamus D, Yu Q, Li Y, Yang H W, Li J Q. Climate constraints on growth and recruitment patterns of *Abies faxoniana* over altitudinal gradients in the Wanglang Natural Reserve, eastern Tibetan Plateau. *Australian Journal of Botany*, 2012, 60(7): 602-614.
- [41] Takahashi K, Tokumitsu Y, Yasue T K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan. *Ecological Research*, 2005, 20(4): 445-451.
- [42] Peterson D W, Peterson D L. Effects of climate on radial growth of subalpine conifers in the North Cascade Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(9): 1921-1932.
- [43] Oberhuber W. Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiology*, 2004, 24(3): 291-301.
- [44] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 任贾文, 王瑜. 西藏林芝冷杉树轮稳定碳同位素对气候的响应. 冰川冻土, 2002, 24(5): 574-578.
- [45] 赵志江, 康东伟, 李俊清. 川西亚高山不同年龄紫果云杉径向生长对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(1): 173-179.
- [46] 侯鑫源. 湖北神农架自然保护区不同海拔高度巴山冷杉径向生长对气候的响应[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [47] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮—气候关系及其衰退原因. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1935-1944.
- [48] 张贇, 尹定财, 孙梅, 李丽萍, 田昆, 张卫国. 滇西北石卡雪山2个针叶树种森林上限径向生长对温度和降水的响应. 生态学报, 2018, 38(7): 2442-2449.
- [49] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [50] 吴普, 王丽丽, 黄磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性. 地理研究, 2006, 25(1): 43-52.
- [51] Liang E Y, Leuschner C, Dulamsuren C, Wagner B, Hauck M. Global warming—related tree growth decline and mortality on the north—eastern Tibetan plateau. *Climatic Change*, 2016, 134(1/2): 163-176.
- [52] Guo G A, Li Z S, Zhang Q B, Ma K P, Mu C L, Pumijumong N, Zhang Q B, Eckstein D, Baas P. Dendroclimatological studies of *Picea likiangensis* and *Tsuga dumosa* in Lijiang, China. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 435-441.
- [53] 郭明明, 张远东, 王晓春, 刘世荣. 川西米亚罗林区主要树木生长对气候响应的差异. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2237-2243.