DOI: 10.5846/stxb201710091794

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): - .

Zhang Y, Yin D C, Zhang W G, Yue H T, Du Jiecidan, Li Q P, Yang R, Tian K. Response of radial growth of two conifers to temperature and precipitation in Potatso National Park, Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

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

张 贇1, 尹定财1,*,张卫国1, 岳海涛1, 杜杰次丹2, 李秋平2, 杨 荣2, 田 昆1

1 西南林业大学国家高原湿地研究中心,昆明 650000

2 云南碧塔海省级自然保护区管理局,香格里拉 674400

摘要:本文基于树轮年代学方法,利用普达措国家公园海拔上、下限丽江云杉(Picea likiangensis)和长苞冷杉(Abies georgei)树轮 宽度资料,构建差值年表并分析其与温度和降水的关系,阐明影响该区域2个主要针叶树种径向生长的主要气候要素。结果表 明:(1)海拔下限丽江云杉径向生长同时受到温度和降水的影响:与上年11月平均温、当年生长季后期(9—10月)平均温和上 年7月降水呈显著正相关;(2)海拔上限丽江云杉径向生长只受温度影响,与上年生长季后期平均温呈显著负相关,与当年生 长季盛期(6—8月)平均温呈显著正相关;(3)长苞冷杉径向生长只与温度表现出显著相关性,海拔下限的生长与上年11月平 均温呈显著正相关,海拔上限的生长与当年生长季盛期平均温呈显著正相关。本文结果可为研究气候变化对滇西北高原树木 生长影响提供参考,并为滇西北高原森林生态系统管理与保护提供理论依据。

关键词:树木年轮;海拔分布上限;海拔分布下限;丽江云杉;长苞冷杉;气候响应

Response of radial growth of two conifers to temperature and precipitation in Potatso National Park, Southwest China

ZHANG Yun¹, YIN Dingcai^{1,*}, ZHANG Weiguo¹, YUE Haitao¹, DU Jiecidan², LI Qiuping², YANG Rong², TIAN Kun¹

1 National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650000, China

2 Administration of Yulong Snow Mountain Provincial Reserve, Lijiang 674400, China

Abstract: The Hengduan Mountain is located to the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, which is sensitive to climate change and a hot spot for tree-ring research; it has rich biodiversity and significant climate changes, so it plays an important role in climate change research. Up to now, tree-ring research in this area concentrated on the upper distributional limits, however the systematic study of both the upper and lower distributional limits was out of focus. Based on the dendrochronological method, we established the residual chronologies of *Picea likiangensis* and *Abies georgei* at their upper and lower distributional limits by using tree-ring width data, and studied the relationship between the residual chronologies, temperature and precipitation. The study can identify the key climatic factors that affect the radial growth of two conifers. The results showed that: (1) The radial growth of *Picea likiangensis* was affected by both temperature and precipitation at its lower limits; there were significant and positive correlations between its growth and November mean temperature (T_{mean}) in the previous year, T_{mean} of post growing season (September-October) in the current year and July precipitation in previous

基金项目:自然科学基金项目(31600395);云南省教育厅科学研究基金项目(2015Z136,2017YJS094);云南省高原湿地科学创新团队项目 (2012HC007);西南林业大学科技创新基金项目(C17139)

收稿日期:2017-10-09; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yindingcai@126.com

year. (2) The radial growth of *Picea likiangensis* was only affected by temperature at its upper limits, by showing a negative correlation with T_{mean} of post growing season in the previous year, and a significantly positive correlation with T_{mean} of growing season (June-August) in the current year. (3) The radial growth of *Abies georgei* was only correlated with temperature. November T_{mean} in the previous year and growing season T_{mean} in the current year positively affected its growth at lower and upper distributional limits respectively. The results of this paper can offer a reference for the study in effects of climate change on tree growth in Northwest Yunnan Plateau, and provide a theoretical basis for the management and protection of forest ecosystems in the area.

Key Words: dendrochronology; upper distributional limits; lower distributional limits; *Picea likiangensis*; *Abies georgei*; climate response

气候变化正改变地球生态系统的稳定性和持续性,进而影响人类的生存环境^[1]。森林是陆地生态系统 的主体,且易受气候变化影响。树木作为森林生态系统的基本单元,研究其径向生长对气候变化的响应,有助 于揭示影响森林生产力的关键气候要素,并为预测气候变化背景下的森林动态发展提供科学依据^[2-4]。树木 径向生长除受树木本身的遗传因子制约外,还受环境因子尤其是气候的影响,运用树木年轮学方法去除生长 趋势等非气候要素的影响后,树轮宽度指数将保留大量过去气候变化的信息,因此树木年轮被广泛应用于树 木生长与气候要素关系及气候重建研究中^[5-6]。

在树木生理活动极限区,径向生长对气候变化尤为敏感^[7]。普遍认为海拔上限树木径向生长主要受温度限制,而海拔下限主要受降水影响,但这一规律并不是在所有地区都适用^[8]。例如,喜马拉雅山南坡海拔上限糙皮桦(Betula utilis)径向生长受季风前降水而非温度的限制^[9]。长白山海拔上限红松(Pinus koraiensis)径向生长同时受温度和降水的影响,而海拔下限树木径向生长受温度影响^[10]。色季拉山不同海拔急尖长苞冷杉(Abies georgei var. smithii)径向生长均受7月最低温度限制,与降水无关^[11]。上述研究结果表明,不同海拔树木生长对气候变化存在响应差异,因而同时开展海拔上、下限树木径向生长与气候要素关系的研究,才能准确反映影响某区域树木生长的关键气候要素。

青藏高原是全球气候变化敏感区,也是树轮研究的热点区域^[12-15]。青藏高原东南缘的横断山区生物多 样性丰富,气候变化显著,在气候变化研究中具有重要地位^[16]。近年来,已有学者利用树轮资料重建了该区 域的年际与夏季温度^[17-18]。同时阐明了高海拔针叶树种径向生长与气候要素的关系^[19]。例如,白马雪山海 拔上限长苞冷杉(*Abies georgei*)径向生长与上年冬季和当年生长季的温度呈正相关^[19]。玉龙雪山海拔上限 丽江云杉(*Picea likiangensis*)的径向生长受生长季初期的干旱制约,而生长季盛期(当年 6—8月)的高温会促 进海拔上限长苞冷杉径向生长^[20]。石卡雪山海拔上限丽江云杉径向生长受生长季前温度限制,当年生长季 后期温度促进海拔上限长苞冷杉径向生长^[16]。但以往研究多集中于海拔上限,海拔下限研究缺乏。普达措 国家公园作为该区域云、冷杉保存完整的区域,以往树轮研究仅限于海拔上限^[21],同时开展海拔上限和下限 树木径向生长对气候响应的研究工作,有助于全面理解影响该区域树木生长的主要气候要素。

本文以普达措国家公园为研究区域,选取滇西北高原主要针叶树种丽江云杉和长苞冷杉为研究对象。运 用树木年轮学方法建立2个树种的树轮宽度年表,并利用响应函数和滑动响应分析,研究该地区海拔上、下限 两个树种径向生长与温度和降水的关系,以及这种关系的稳定性。以揭示影响该区域针叶树径向生长的关键 气候要素,从而为未来气候变化背景下普达措国家公园森林保护与管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

普达措国家公园(27°43′42″—28°04′33″N,99°54′16″—100°11′42″E)地处青藏高原东南缘,是滇西北重要的生态屏障,作为我国大陆第一个国家公园,拥有云南省保护最完整和原始的云、冷杉林^[22]。区内海拔为

2347—4159 m, 植被分布垂直带性显著。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(2400—3200 m); 以麦吊云杉(*Picea brachytyla*)、丽江云杉和大果 红杉为主的寒温性针叶林(3200—3850 m); 以长苞冷杉为主的寒温性针叶林(3500—4000 m); 以高山杜鹃和 草甸为主的寒温性灌丛(4000—4159 m)^[23]。

丽江云杉和长苞冷杉是区内寒温性针叶林带的优势树种。丽江云杉一般分布在土层松软、水分条件较好的阴坡、半阴坡的地势平缓处,群落环境较为湿润;长苞冷杉耐寒、耐荫性强,群落气候环境寒冷潮湿。丽江云 杉较长苞冷杉更喜干暖,分布地较长苞冷杉温暖干燥^[23]。

研究区主要受南亚季风环流影响控制,加之地势高,形成独特的高原季风气候。根据香格里拉气象站 1960—2011 年气象资料显示,区域年平均温 5.9 ℃,最热月(7月)平均温 13.6 ℃,最冷月(1月)平均温 -3.0 ℃。区域年均降水量 633.6 mm,但季节分配不均,主要集中在 6—9月,占全年降水的 73%(图 1a)。近 50 年来,香格里拉年平均温上升趋势明显(图 1b),年平均降水量有增加的趋势,但并不显著(图 1c)。





Fig.1 Climate date from Shangri-La meteorological station(1960-2011)

a,月平均温和月降水量;b,年平均温变化;c,年平均降水量变化

1.2 样品采集与年表建立

分别在普达措国家公园内丽江云杉和长苞冷杉海拔分布的上、下限,设立4个采样点进行年轮采样(表 1)。样点设置在未受人为干扰的森林群落,按照树木年轮学方法,选取树龄较大、位于林冠层且生长状况良 好的丽江云杉和长苞冷杉,用内径为5.15 mm 的生长锥在树木胸高(1.3 m)位置钻取完整的树轮样芯,每株树 从不同方向钻取2个样芯,装入事先准备的吸管内并进行编号。

将采集的样芯带回实验室,用乳胶将样芯粘贴在特制的木槽中,并用胶带固定。待自然风干后,用 240、 320、600 目的砂纸逐步打磨样芯直至树轮在显微镜下清晰可见。先将样芯放在双筒显微镜下进行目视定年, 然后置于 EPSON Scan(Expression11000XL)扫描仪中依次进行扫描并编号,扫描仪参数为专业模式图像类型

3

24 位全彩,分辨率为 3200dpi,扫描后的图像利用 CDendro and CooRecorder ver. 7.3 软件^[24]测量年轮宽度,精 度为 0.001mm,利用 COFECHA 程序^[25]对样品进行交叉定年并对结果进行检验,剔除不能交叉定年和与主序 列相关性低的样芯,将保留的样芯用于年表建立(表2)。

Table 1 Description of sampling sites						
树种 Species	代码 Code	采样时间 Sampling time	海拔/m Altitude/m	经度/E Longitude/E	纬度/N latitude/N	样本量(树/样芯) No. (tree/core)
丽江云杉 Picea likiangensis	P1	2016.11	3250	100°02′39″	27°50'22"	26/52
	P2	2015.08 2016.11	3786	99° 59′ 50″	27°47′56″	27/54
长苞冷杉 Abies georgei	A1	2017.06	3488	99°57′34″	27°54′42″	30/60
	A2	2015.08 2106.11	3954	100°00′12″	27°47′10″	29/58

表1 采样点概况

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

统计特征 Statistic characters	P1	P2	A1	A2
样本量(树/样芯) No.(tree/radii)	24/48	26/51	29/57	26/52
序列长度 Time span/A.D	1811—2016	1837—2016	1571—2016	1761—2016
EPS>0.85 起始年/样芯数 Year since EPS>0.85/cores	1901—2016/ 12	1854—2016/ 9	1695—2016/ 10	1805—2016/ 12
平均敏感度 Mean sensitivity	0.14	0.11	0.12	0.13
公共区间 Common intervals/a	1936—2014	1960—2010	1751—2000	1857—2015
公共区间统计量				
标准差 Standard deviation	0.13	0.10	0.11	0.11
信噪比 Signal-to-noise ratio	20.33	32.66	11.83	17.39
样本总体代表性 Expressed population signal	0.95	0.97	0.92	0.95
第一主成分方差解释量/% Variance in first eigenvector	36.02	43.12	41.87	36.25

运用 ARSTAN 程序^[26]建立年表,采用步长为样本长度 67%的样条函数进行拟合,去除树木本身的遗传因 子和干扰竞争的影响。最终建立了普达措国家公园丽江云杉和长苞冷杉的标准年表(STD),差值年表(RES) 和自回归年表(ARS)。通过比较不同年表的统计特征值,差值年表的各项统计值均高于其他年表,且由于差 值年表(图 2)中保存了较高质量的高频信息[27],因此本研究选择利用差值年表与气候要素进行分析。

1.3 气象资料

气象资料选取距离采样点最近的香格里拉气象站(27°50′N,99°42′E,海拔3276.7 m),气象资料来源于中 国气象科学数据共享网(http://data.cma.cn)。资料时段为 1960—2011 年。采用 Mann-Kendall 方法^[28]对气 象资料进行均一性检验,结果表明,温度和降水数据变化相对均一,可满足本研究对气候要素分析的需要。将 平均温和降水两个气候指标用于与年表的相关性分析。

1.4 数据分析

考虑到气候对树木生长的滞后效应[19],选取上年7月至当年10月,以及上年生长季后期(上年9—10 月)和当年生长季前期(当年4-5月)、盛期(当年6-8月)及后期(当年9-10月)的平均温度和降水与4个 样点的差值年表进行响应分析。响应分析利用 DendroClim2002 软件^[30]完成。响应函数对气候要素先提取主 成分量再进行回归分析,能够更加准确的反映出样本数据受环境因子的影响程度^[31]。同时运用 Evolutionary and Moving Response and Correlation 模块,通过 Moving forward(窗口年限为32年)方式分析径向生长与气候要



图 2 树轮宽度差值年表 Fig.2 Residual tree-ring chronology R:年轮指数;S:样本量. R: Tree-ring index; S:Number of samples

素的动态关系,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 软件完成。

2 结果与分析

2.1 年表的统计特征

普达措国家公园丽江云杉和长苞冷杉年表统计参数如表 2 所示,建立的 4 个年表均对气候具有较高敏感性,统计量中平均敏感度在 0.11—0.14 间,信噪比在 11.83—32.66 间,第一主成分的方差解释量在 36%以上。 样本总体代表性在 0.92—0.97,均超过了树木年轮分析中总体代表性 0.85 的阈值^[32],表明年表质量较好,适 合用于与气候要素的分析。

2.2 径向生长对气候要素的响应

丽江云杉差值年表与逐月气候要素的响应分析结果表明(图3),海拔下限丽江云杉径向生长同时受温度 和降水的影响,与上年11月平均温和上年7月降水呈显著正相关。海拔上限丽江云杉径向生长只受温度影 响,分别与上年10月平均温和当年7月平均温表现为显著负相关与显著正相关。与生长季气候要素的分析 结果表明(图4),当年生长季后期的平均温促进海拔下限丽江云杉径向生长。另外,丽江云杉径向生长与当 年生长后期温度达到显著正相关,而与单月(当年9和10月)温度未达到显著相关,说明了温度累积效应对 丽江云杉径向生长的重要性。海拔上限丽江云杉径向生长与当年生长季盛期平均温表现为显著正相关,而上 6

长苞冷杉差值年表与逐月气候要素的响应分析结果表明(图3),长苞冷杉树木径向生长只受温度影响。 上年11月平均温和当年7月平均温分别促进其海拔下限与海拔上限的径向生长。与生长季气候要素的相关 分析结果表明(图4),长苞冷杉海拔上限树木径向生长与当年生长季盛期平均温呈显著正相关。



图 3 海拔上、下限丽江云杉和长苞冷杉对温度和降水的响应



p,上年; * p< 0.05

2.3 径向生长与气候要素的动态关系

滑动分析结果(图 5)表明:海拔下限丽江云杉径向生长上年 11 月平均温关系的稳定性较强,在大部分时间区间内达到显著水平;与上年 7 月降水关系的稳定性一般,在部分时间区间内达到显著水平。海拔上限丽江云杉径向生长与当年 7 月和上年 10 月平均温的关系具有非常强的稳定性,在全部时间区间内达到显著水平。

在海拔下限长苞冷杉滑动区间内(图5),与上年11月平均温关系的稳定性相对较差,仅在部分时间区间





内达到显著水平。海拔上限长苞冷杉径向生长与当年7月平均温关系的稳定性一般,在部分时间区间内达到显著水平。

3 讨论

3.1 2个树种径向生长对气候响应的共性

普达措国家公园丽江云杉和长苞冷杉海拔上限的径向生长均与当年生长季盛期(尤其是 7 月)的平均温度呈显著正相关。夏季处于树木生长最为旺盛的时段,较高的温度有利于增强光合作用,生成更多的碳水化合物用于树木生长,从而形成宽轮^[33]。这与玉龙雪山海拔上限长苞冷杉与温度关系的研究结果一致^[10],类似的结果在北美西部蛇山地区海拔上限狐尾松(*Pinus longaeva*)^[33]和在欧洲阿尔卑斯山地区海拔上限挪威云杉(*Picea abies*)研究中均有报道^[34]。

丽江云杉和长苞冷杉在海拔下限均表现出与上年11月平均温的显著正相关关系,这可能是由于冬季较高的温度能保证树木叶组织的正常代谢活动,增大树木下年生长潜力^[35]。若冬季温度过低,会使得树木叶组织冻结,针叶死亡,影响下年树木光合作用,从而制约树木生长^[36]。这与普达措国家公园大果红杉径向生长与温度关系的研究结果一致^[37],说明上年11月温度是影响该区域针叶树生长的关键气候要素。

3.2 2个树种径向生长对气候响应的差异

海拔下限丽江云杉与上年7月降水显著正相关,上年7月的降水充足能够保障夏季末期土壤水分状况良





好,有利于树木进行光合作用并积累营养^[38],从而为下年树木生长提供能量。这与赵志江等对香格里拉小中 甸丽江云杉的研究结论一致^[39]。而海拔下限的长苞冷杉并未表现出与降水的关系,这可能是由于长苞冷杉 分布下限的海拔较丽江云杉更高,降水更多。且长苞冷杉采样点距属都湖较近,空气与土壤湿度较大,因此其 生长对降水的敏感性不高。

丽江云杉海拔分布上、下限径向生长均受生长季后期温度影响,但响应模式(分别为滞后效应的负相关

9

与当年的促进作用)却不同,说明海拔差异对分析树木生长与气候要素关系的重要性。生长季后期树木依然 缓慢生长,温度的增加延长了生长季,从而有利于当年形成宽轮^[40],但由于大量营养物质的消耗,可能不利于 来年树木的生长^[41]。丽江云杉在海拔上、下限对生长季后期温度的响应差异,可能与海拔分布的水热条件不 同有关,其机理有待进一步研究。但本文的结果表明丽江云杉下限的生长更依赖于当年有机物的积累,而上 限的生长则受温度滞后效应制约。生长季后期温度对当年树木生长的促进作用在相邻川西王朗保护区的紫 果云杉(*Picea purpuea*)研究中也有发现^[40]。另外,长苞冷杉并未与生长季后期的温度表现出显著相关性,说 明该气候要素并不是该树种生长的限制性因子。

3.3 径向生长与气候要素的稳定性分析

由 2 个树种海拔上、下限树木径向生长与气候要素关系稳定性的分析可知(图 4),4 个样点树木的径向 生长与气候要素的关系的稳定性不同,说明不同树种对气候要素的响应存在差异。海拔上限与气候要素关系 的稳定性较海拔下限更强,说明海拔差异对树木径向生长与气候要素的响应关系存在影响。丽江云杉与气候 要素关系的稳定性较长苞冷杉更强,说明该区域丽江云杉或许更适合于树木年轮气候学研究,从而为气候重 建时的树种选择提供参考。

4 结论

温度是影响普达措国家公园丽江云杉和长苞冷杉径向生长的主要气候要素,仅丽江云杉下限的径向生长 与降水存在显著相关性。当年生长季与上年11月的温度分别是影响该区域海拔上限和下限针叶树生长的关 键气候要素。气候的滞后效应对丽江云杉径向生长的影响更大。

参考文献(References):

- [1] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 气象出版社, 1990.
- [2] 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.
- [3] Zhang Q B, Evans M N, Lyu L. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries. Nature Communications, 2015, 6: 8062.
- [4] Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan J O, Herzig F, Heussner K U, Wanner H, Luterbacher J, Esper J. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. Science, 2011, 331:578-582.
- [5] Fritts H C. Reconstruction Large Scale Climate Patterns from Tree Ring Data. Tucson: The University of Arizona Press, 1991.
- [6] Nie, C Y, Zhang, Q B, Lyu, L. Millennium-long tree-ring chronology reveals megadroughts on the southeastern Tibetan plateau. Tree-Ring Research, 2017, 73(1): 1-10.
- [7] Liang E Y, Liu B, Zhu L P, Yin Z Y. A short note on linkage of climatic records between a river valley and the upper timberline in the Sygera Mountains, Southeastern Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 2011, 77(1): 97-102.
- [8] Yu D P, Wang G G, Dai L M, Dai M L, 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.
- [9] Liang E Y, Dawadi B, Pederson N, Eckstein D. Is the growth of birch at the upper timberline in the Himalayas limited by moisture or by temperature?. Ecology, 2016, 95(9): 2453-2465.
- [10] 陈力, 尹云鹤, 赵东升, 苑全治, 吴绍洪. 长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2014, 34(6): 1568-1574.
- [11] Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, Liu B, Shao X M. Growth Variations In Abies Georgei Var. Smithii Along Altitudinal Gradients In The Sygera Mts., Southeastern Tibetan Plateau. Trees-Structure And Function, 2010, 24: 363-373.
- [12] Shao X, Xu Y, Yin Z Y, Liang E Y, Zhu H, Wang S. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 2111-2122.
- [13] Zhu H F, Xu P, Shao X M Luo H J. Little Ice Age glacier fluctuations reconstructed for the southeastern Tibetan Plateau using tree rings. Quaternary International, 2013, 283(2):134-138.
- [14] Liang E Y, Wang Y F, Piao S L, Lu X M, Camarero J J, Zhu H F, Zhu L P, Ellison A M, Ciais P, Penuelas J. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 2016, 113(16): 4380-4385.

[15]	Grießinger J, Bräuning A, Helle G, Thomas A, GSchleser G. Late Holocene Asian summer monsoon variabilityreflected by δ^{18} O in tree-rings from
	Tibetan junipers. Geophysical Research Letters, 2011.
[16]	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):377.
- [17] Berg A, Norgård G, Greve G. Annual temperature reconstruction in the Central Hengduan Mountains, China, as deduced from tree rings. Dendrochronologia, 2008, 26(2): 97-107.
- [18] Fan Z X, Bräuning A, Yang B, Cao K F. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in southern China. Global and Planetary Change, 2009, 65: 1-11.
- [19] Fan Z X, Bräuning A, Cao K F, Zhu S D. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains in southern China. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 306-313.
- [20] 张卫国,肖德荣,田昆,陈广磊,和荣华,张赟.玉龙雪山3个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应.生态学报,2017,37(11): 3796-3804.
- [21] 余佳霖,张卫国,田昆,松卫红,李秋平,杨荣等.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.北京林业大学学报,2017,39(1):43-51.
- [22] 唐芳林. 国家公园试点效果对比分析——以普达措和轿子山为例. 西南林业大学学报, 2011, 31(1): 39-44.
- [23] 云南植被.科学出版社, 1987.
- [24] Larsson L A. CDendro v. 7.3. CybisElektronik & Data A B. Sweden: Saltsjöbaden, 2010.
- [25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43(3): 69-75.
- [26] Cook E R, Holmes R L. Users Manual for Program ARSTAN: Laboratory of Tree-ring Research. University of Arizona press, 1986.
- [27] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. 地理学报, 1994(2): 174-181.
- [28] Kendall MG, Gibbons JD. Rank Correlation Methods, 5th ed. London: Edward Arnold, 1990.
- [29] 李江风. 树木年轮水文学研究与应用. 科学出版社, 2000.
- [30] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.
- [31] Briffa K R, Cook E R. Methods of response function analysis. In Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Edited by E.R. Cook and L. Kairiukstis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. pp. 1990, 240-248.
- [32] Wigley T M, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.
- [33] Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, Kipfmueller K F. Recent unprecedented tree-ring growth in Bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. 2009, 106(48): 20348-20353.
- [34] Meyer F D, Braker O U. Climate response in dominant and suppressed spurce trees, Picea abies (L.) Karst., on a subalpine and lower montane site in Switzerland. Ecoscience, 2001, 08(1): 105-114.
- [35] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽资料所指示的川西过去气候变化. 第四纪研究, 1999, 19(1): 81-89.
- [36] 喻树龙,袁玉江,魏文寿,尚华明,张同文,童忠.天山北坡西部树木年轮对气候因子的响应分析及气温重建.中国沙漠,2008,28(5): 827-832.
- [37] 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.
- [38] Rolland C. Tree-ring and climate relationships for Abies alba in the internal Alps. Tree-ring Bulletin, 1993, 53: 1-11
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 王婷. 天山中部不同海拔高度天山云杉林的生态学研究. 武汉大学, 2004.