

文章编号: 1008-2786-(2017)6-816-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000282

贡嘎山峨嵋冷杉上下限径向生长 与气候因子的关系

贾 敏^{1,2}, 朱万泽^{1*}, 王文志¹

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 通过贡嘎山海螺沟峨嵋冷杉海拔分布上下限树轮宽度的测定, 采用负指数法(NEC)、区域曲线标准化法(RCS)和断面面积修正法(BAI)建立树轮宽度年表, 基于临近康定气象站气候数据, 分析了不同趋势拟合方法峨嵋冷杉径向生长对气候响应的差异。结果表明, 采用断面面积修正法建立的年表更能准确地表征峨嵋冷杉的生长趋势; BAI 年表与逐月气候因子相关分析显示, 在峨嵋冷杉海拔分布下限, 树木径向生长与前一年 6~9 月温度呈显著负相关, 温度是影响峨嵋冷杉海拔分布下限径向生长的主要因子; 林线峨嵋冷杉与当年 7 月温度和 5 月降水呈显著正相关, 温度和降水的耦合作用影响林线峨嵋冷杉的径向生长。

关键词: 峨嵋冷杉; 径向生长; 趋势拟合方法; 气候因子

中图分类号: K903

文献标志码: A

森林是陆地生态系统的重要组成部分, 在陆地生态系统碳循环过程中起着重要的作用。森林作为地球上最大的陆地碳汇, 树木生长速率的变化影响生物量, 进而影响森林碳收支动态^[1,2]。森林尤其是亚高山森林生态系统对全球气候变化十分敏感^[3,4]。气候条件的变化, 如温度升高、降水格局变化、CO₂ 浓度升高和极端气候事件增加等直接影响森林生态系统的分布、结构、初级生产力以及碳循环^[5-8]。此外, 气候变化引起森林火灾和虫害风险的加大会对森林生态系统结构和功能产生重要影响^[4]。

尽管森林清查评估和遥感反演可以估算森林生物量, 但这些方法难以深入探究树木生长动态, 以及长时间序列森林种群及群落生产力动态^[9]。树轮数据有助于理解森林生产力形成机理, 以及气候变

化背景下森林碳收支, 从而重建百年尺度上森林生产力动态。森林生产力动态的重建需要理解树木的生长趋势^[10]。近几十年来, 许多学者提出了树木生长趋势的各种拟合方法, 如负指数函数^[11]、样条函数^[12]、幂函数^[13]、线性回归^[14]、双曲线函数和多项式函数^[15]、区域曲线标准化^[16]、零信号去趋势法^[17]、断面面积修正法^[18]、径级法^[19]、参考年龄级法^[20]等。不同趋势拟合方法影响着树轮年表的质量和其中所含的不同频域气候信号, 同时, 趋势拟合方法因不同区域、不同树种而异^[21,22], 因此, 选择合适的趋势拟合方法至关重要。

峨嵋冷杉林(*Abies fabri* Craib) 是我国西南亚高山暗针叶林的主要类型之一^[23], 也是川西亚高山森林生态系统的典型树种^[24], 在涵养水源、保持水土、调节气候、维护生态平衡等方面具有重要的作用。

收稿日期 (Received date): 2017-02-05; **改回日期** (Accepted date): 2017-06-25

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目(2017YFC0505004); 国家自然科学基金项目(41601206); 中国科学院成都山地所“135 方向性项目”(SDS-135-1707) [National Key R&D Program of China(2017YFC0505004); National Natural Sciences Foundation of China(41601206); 135 Strategic Program of the Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS (SDS-135-1707)]

作者简介 (Biography): 贾敏(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林生态[Jia Min(1991-), female, M. Sc. candidate, research on forest ecology] E-mail: 274922127@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 朱万泽, 男, 研究员, 研究方向: 森林生态[Zhu Wanze, male, professor, specialized in forest ecology] E-mail: wzzhu@imde.ac.cn

目前对峨眉冷杉的研究主要集中于种群的结构和动态^[25]、生物量 and 生产力^[26]方面,而关于峨眉冷杉对气候变化响应的研究尚少。本文通过贡嘎山海螺沟的峨眉冷杉海拔分布上下限树轮的测定,采用负指数法、区域曲线标准化法和断面积修正法三种方法建立峨眉冷杉宽度年表,试图揭示峨眉冷杉海拔分布上下限的生长特征及其对气候的响应差异,为应对未来气候变化对峨眉冷杉生长的影响提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

贡嘎山位于横断山脉东部,大渡河与雅砻江之间大雪山脉中南段,主峰高达 7556 m,气候上处于我国东部季风区亚热带与青藏高原高寒区温带的过渡带,具有过渡性和复杂性特点^[27]。研究区(图 1)位于贡嘎山东坡,属山地寒温带气候类型,年均降水量 1902 mm,其中 70% 的降水集中在 5~9 月,年均气温 4.2℃。贡嘎山东坡植被垂直分异由低至高分别为:常绿阔叶林(海拔 1100~2200 m)、山地针阔叶混交林(2200~2500 m)、亚高山暗针叶林(2500~3600 m)、高山灌丛草甸(3600~4600 m)、

高山流石滩稀疏植被(4600~4900 m)^[27]。峨眉冷杉是贡嘎山东坡亚高山暗针叶林的主要建群种和林线树种,主要分布于海拔 2800~3700 m。

1.2 样品采集和年表建立

2015 年 9 月在贡嘎山海螺沟峨眉冷杉海拔分布下限 2700 m 和上限 3600 m,分别设置 100 m × 50 m 样地(图 1),对于样地内胸径大于 5 cm 的峨眉冷杉,在树木胸高处分别用直径 5.16 mm 和直径 10 mm 的生长锥采集 1~2 根样芯。样芯采集后,将样品粘贴在样条槽上,在实验室晾干,用不同粒径砂纸按照由粗到细的顺序进行打磨,直到每个年轮的早晚材界限和细胞结构能够借助显微镜清晰的分辨出来。

将打磨后的样品在显微镜下进行初步定年,然后用精度为 0.01 mm 的树轮宽度量测仪 LINTAB 6.0 对每一年的生长宽度进行测定。为确保定年和宽度量测结果的准确性,用 COFECHA 程序对量测结果进行检验。用负指数曲线法(NEC)、区域曲线标准化(RCS)和断面积修正法(BAI)三种方法建立峨眉冷杉径向生长年表^[32]。所有年表的建立由 R 软件 DPLR 数据包完成。

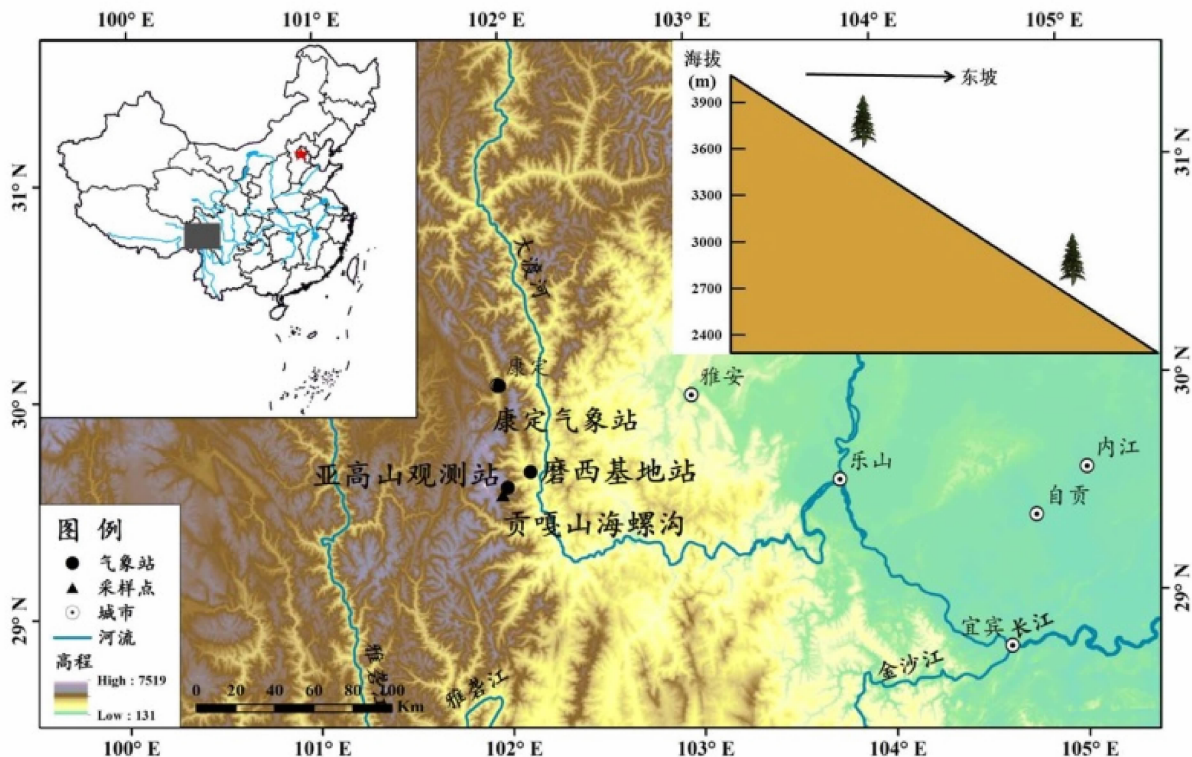


图 1 峨眉冷杉树轮采样点和气象站示意图

Fig. 1 Location and topography of study area and sampling sites and the meteorological station

1.3 气候资料与统计分析

由于距离样地最近的亚高山观测站(海拔 3000 m)的气候观测资料只有 20 年数据,难以进行长时间序列气候相关分析,本研究采用距海螺沟 60 km 的康定气象站(海拔 2595 m)气象数据,时间长度为 1952—2015 年。气象要素包括月平均气温和月降水量,数据来自中国气象科学数据共享网(<http://data.cma.cn/>)。考虑到气候因子对峨眉冷杉径向生长的影响存在滞后效应,选取上一年 6 月到当年 9 月(共 16 个月)的月气象数据与三种年表进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 气象数据及其统计分析

中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站亚高山观测站(3000 m)的气象观测数据表明,近 20 多年来年均温以每 10 年 0.29 °C 的速率升高,而年降水量没有显著变化(图 2)。康定气象站的气象数据表明(图 2),1952—2015 年期间年均降水量为 834 mm,其中 77% 的降水集中在 5~9 月,年均气温 7.2 °C。通过对月平均气温和月降水量进行趋势性检验发现,温度序列和降水量序列自 1952 年以来均

呈现显著的上升趋势,年均温升温率为 0.12 °C/10 a,降水量升高幅度为每 10 年增加 14.32 mm。康定气象站与贡嘎山亚高山观测站的气象数据比较发现,二者年均温的相关系数为 0.454 ($P < 0.05$),具有一致的变化趋势。因此康定气象站的气象数据能代表该区域的气候变化特征,适合进行气候相关分析。

2.2 年表特征分析

采用不同趋势拟合方法,建立的贡嘎山峨眉冷杉海拔分布上下限径向生长年表特征存在显著差异。峨眉冷杉海拔分布下限三种年表统计特征对比分析表明,BAI 年表的各参数均大于其他两种年表,暗示采用 BAI 方法建立的年表可能包含更多的气候信号(表 1)。而林线峨眉冷杉三种方法年表统计特征对比表明,NEC 年表的样芯间相关系数(RBAR)、信噪比(SNR)和样本总体代表性(EPS)均比其他两种方法建立的年表高,BAI 年表平均敏感性(MS)和一阶自相关系数(AC1)均高于其他两种年表,表明 NEC 和 BAI 年表可能包含更多的环境信息。此外,林线 NEC 和 RCS 年表的一阶自相关系数(AC1)、信噪比(SNR)和样本总体代表性(EPS)均高于峨眉冷杉海拔分布下限,表明林线对气候因子响应更加敏感。

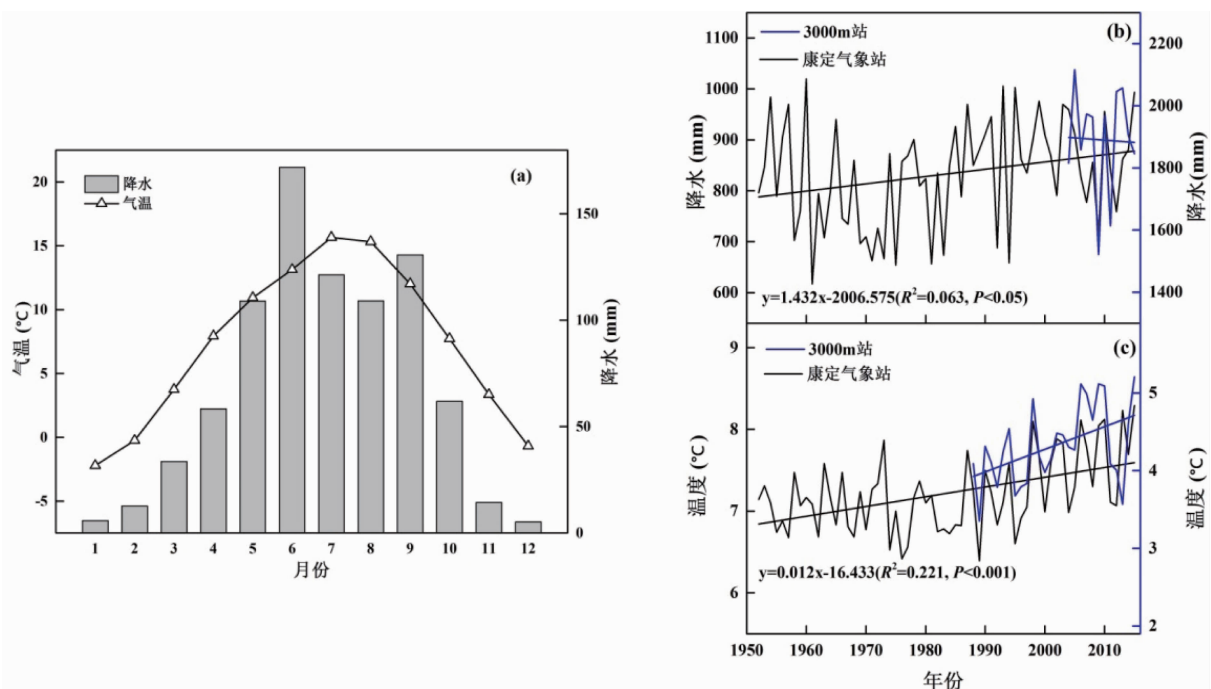


图2 康定气象站 1952 年以来的温度和降水量变化((a)为康定气象站的温度降水的月变化特征,(b)和(c)为康定气象站与 3000m 亚高山观测站的温度降水变化)

Fig.2 Monthly variation (a) and long-term change trends of precipitation (b) and temperature (c)

2.3 峨眉冷杉生长趋势特征

从各年表的变化特征来看,NEC 和 RCS 年表的波动较为一致,虽然 BAI 年表没有进行标准化,但近 100 年来的变化幅度与其他两个年表具有较好的一致性(图 3)。各年表 30 a 滑动曲线波动特征表明,峨眉冷杉海拔分布下限(2700 m)的 RCS 年表在近 60 年来并没有显著变化趋势,NEC 和 BAI 年表

在近 60 年呈现显著下降趋势,其中 BAI 年表以每年 0.129 cm^2 的速率下降。峨眉冷杉海拔分布上限(3600 m)三种年表表明,1950—2015 年期间树轮生长趋势可大致分为两个阶段:1950—1980 年期间存在显著的衰退趋势;1980 年后 NEC 和 BAI 年表存在显著的上升趋势,而 RCS 年表的变化趋势不显著。

表 1 不同年表的主要统计特征

Tab. 1 Major statistic characteristics of three different chronologies

统计量	海拔 2700 m			海拔 3600 m		
	NEC	RCS	BAI	NEC	RCS	BAI
年表长度	1877—2015			1852—2015		
平均年龄	100			123		
标准差(SD)	0.317	0.361	1649.066	0.304	0.396	255.92
平均敏感度(MS)	0.176	0.176	0.18	0.164	0.164	0.167
样芯间相关系数(RBAR)	0.205	0.157	0.307	0.211	0.312	0.316
一阶自相关系数(AC1)	0.671	0.707	0.811	0.714	0.8	0.825
信噪比(SNR)	5.663	4.15	10.102	15.246	9.496	9.962
样本总体代表性(EPS)	0.85	0.806	0.91	0.938	0.905	0.909

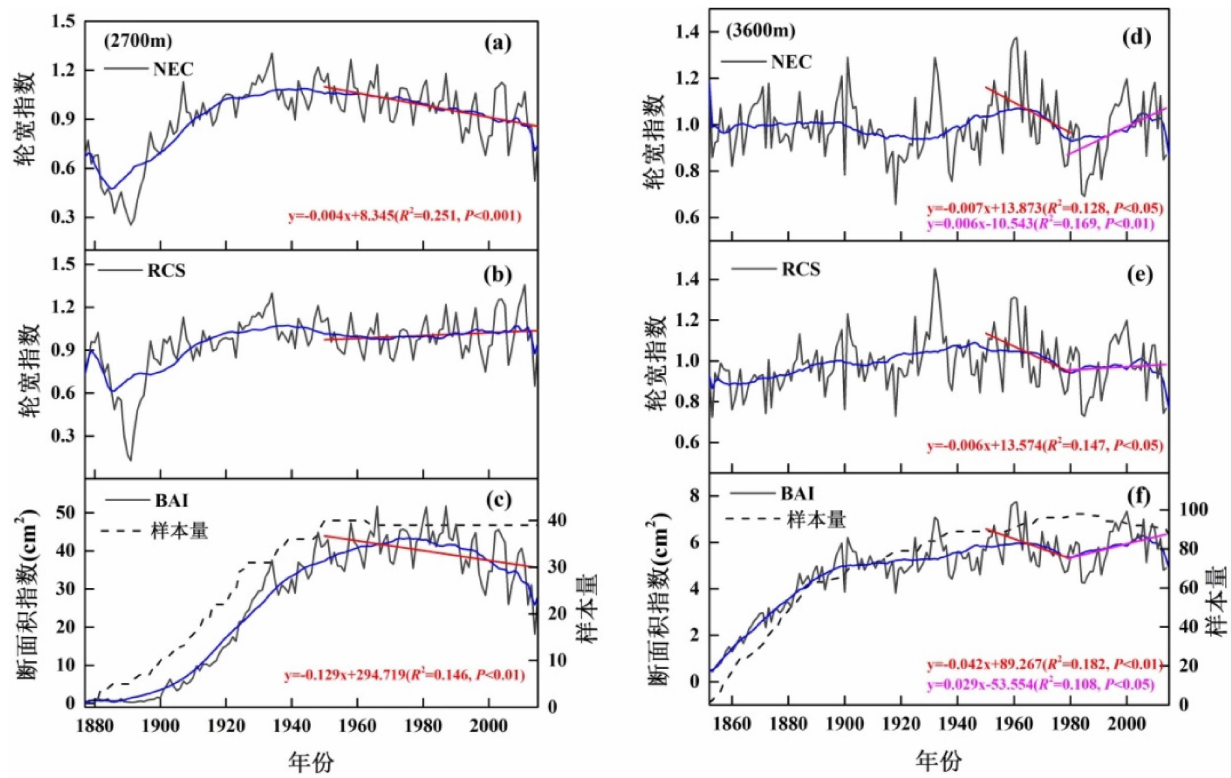


图 3 NEC、RCS 和 BAI 建立的年表(图(a)、(b)、(c)为海拔 2700 m 的年表,图(d)、(e)和(f)为海拔 3600 m 的年表,蓝色曲线为 30 年平滑曲线,红色实线和紫色实线为线性拟合曲线)

Fig. 3 NEC, RCS and BAI chronologies for lower and upper limits.

The blue lines indicated the 30-yr smooth curve; The red and the purple lines indicated the linear fitting curve.

从各年表的相关性特征来看, NEC 和 RCS 年表的相关系数较高, 其中峨眉冷杉海拔分布下限二者之间的相关系数最大(表 2)。BAI 年表与 NEC 和 RCS 年表的相关系数较低, 其中峨眉冷杉林线的 BAI 与 NEC 年表的相关系数最低为 0.405 ($P < 0.01$), 表明不同趋势方法表征峨眉冷杉径向生长存在一定差异。

2.4 年表与气候因子相关性

从各年表与气象数据的相关分析结果来看, 不同年表对气候因子的响应存在差异(图 4)。在峨眉冷杉海拔分布的下限, NEC 与 BAI 年表的响应特征较为一致, 其中 BAI 年表的相关关系最为显著, 具体表现为与前一年 6~9 月温度以及当年 9 月温度呈显著负相关($P < 0.05$), 与前一年 6 月份温度的相关关系达到极显著($P < 0.01$)。表明在峨眉冷杉海拔分布下限用断面积修正法建立的年表对温度更为敏感。

在林线处, 峨眉冷杉三种年表的响应特征较为一致, 尤以 NEC 与 BAI 年表的响应特征最为一致。NEC 与 BAI 年表均与前一年 7 月、9 月以及当年 7 月的温度呈显著正相关关系($P < 0.05$), 且在当年 7

月, 两个年表与温度的相关性均通过了 0.01 的显著性检验, 此外, BAI 年表还与当年 9 月的温度呈显著正相关($P < 0.05$)。三种年表都与前一年 9 月份降水呈显著负相关($P < 0.05$), 与当年 5 月降水呈显著正相关($P < 0.05$), 其中 BAI 与当年 5 月降水的正相关关系达到了极显著($P < 0.01$)。表明林线处断面积修正法建立的年表对温度和降水响应更为敏感, 包含更多的温度和降水信息。

用 BAI 年表与当年 4~6 月、7~9 月和上一年 7~9 月的气候因子进行 31 年的滑动相关分析表明, 当年 4~6 月降水、当年 7~9 月温度和上一年 7~9 月温度的增加会抑制海拔分布下限峨眉冷杉的生长, 促进林线峨眉冷杉的生长, 且随着时间的变化, 相关关系越来越显著(图 5)。当年和上一年 7~9 月降水与峨眉冷杉海拔分布下限有正相关关系, 而与林线峨眉冷杉的生长有负相关关系, 且两种相关性存在相反的波动状态, 1970—1980 年的相关系数达到显著水平($P < 0.05$)。当年 4~6 月温度的增加在 1983 年前促进森林下限峨眉冷杉的生长, 1983 年后相关关系由正变成负。

表 2 三种年表的相关系数矩阵

Tab. 2 Correlation analysis matrix for three different chronologies

趋势拟 合方法	海拔 2700 m			海拔 3600 m		
	NEC	RCS	BAI	NEC	RCS	BAI
NEC	1			1		
RCS	0.887 * *	1		0.821 * *	1	
BAI	0.717 * *	0.618 * *	1	0.405 * *	0.647 * *	1

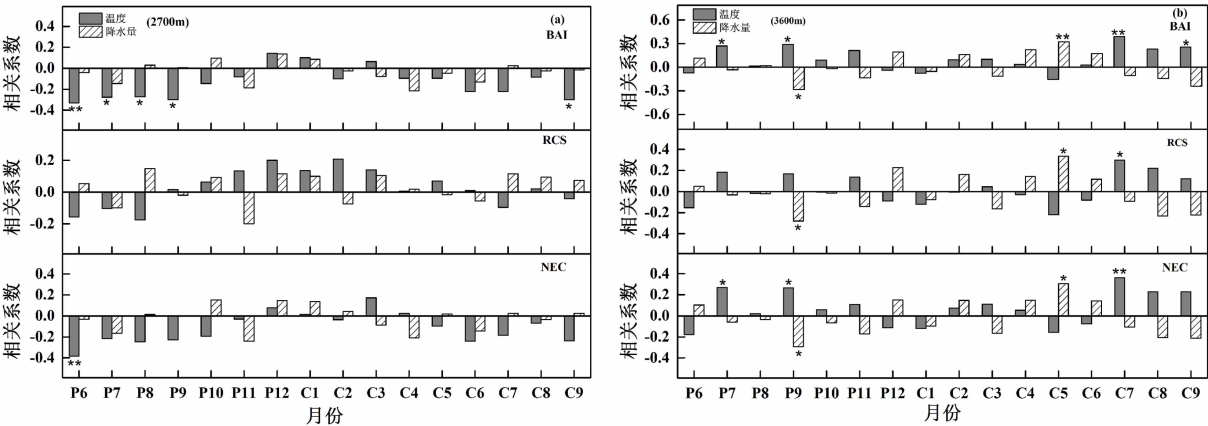


图 4 海拔 2700 m 三种年表与温度降水相关关系 (a), 海拔 3600 m 三种年表与温度降水相关关系 (b), * 表示 95% 置信水平, ** 表示 99% 置信水平

Fig. 4 Correlation analyses between NEC, RCS, BAI chronology and the monthly temperature, precipitation. * indicated the significance 95% level; ** indicated the significance 99% level.

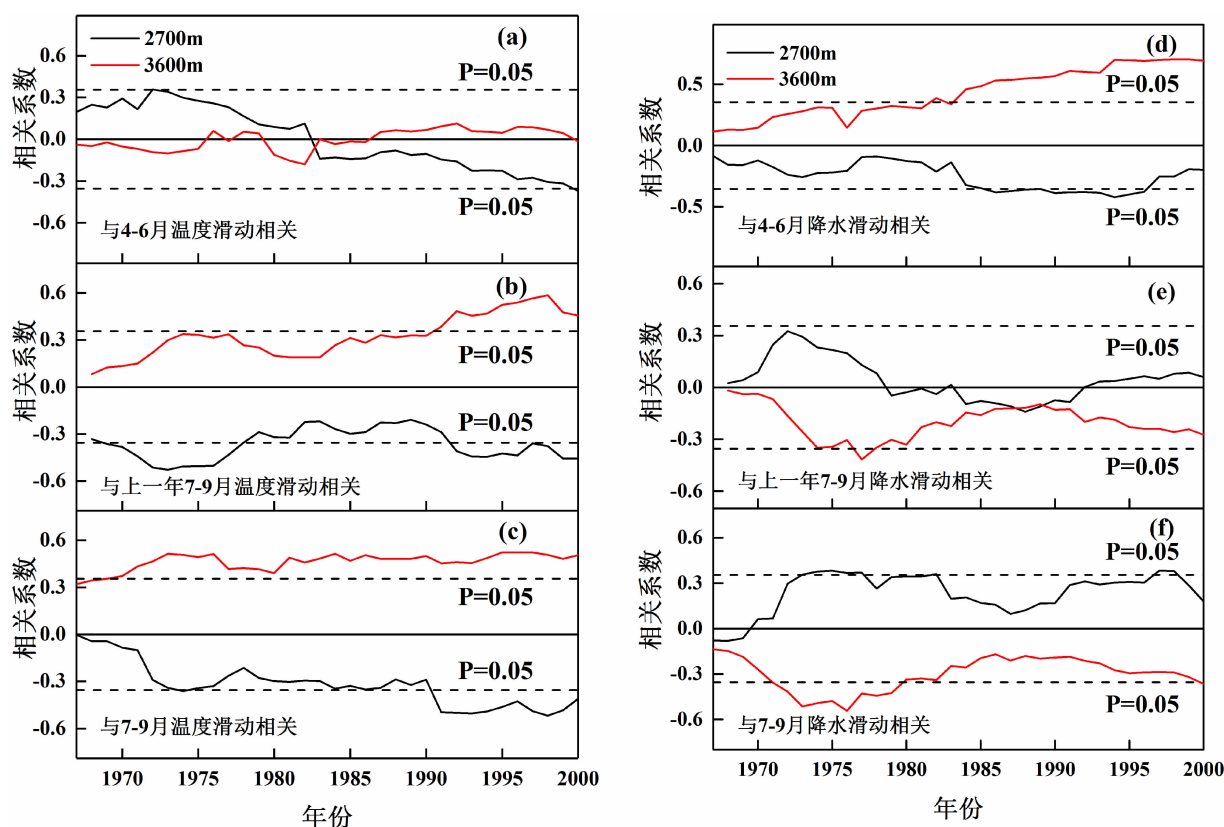


图5 BAI年表与4~6月、上一年7~9月以及7~9月温度和降水31 a滑动相关

Fig.5 31 year moving average cross-correlation analysis of chronologies with the temperature and precipitation in April to June, July to September of current year, as well as July to September of prior year

3 讨论

3.1 不同趋势拟合方法的径向生长年表差异

本文利用负指数法、区域曲线标准化法和断面积修正法对贡嘎山海螺沟海拔分布上下限的峨眉冷杉进行生长趋势拟合并建立年表,其中BAI年表和NEC年表的统计量要高于RCS年表(表2),包含更多的气候信息,印证了BAI与NEC年表对气候因子的响应特征具有一致性。虽然不同年表的统计参数存在差异,但三种年表的统计值均达到较高水平,适用于气候相关分析。

峨眉冷杉海拔分布上下限三个年表的波动趋势较为一致(图3),由于BAI年表不需要标准化,因此NEC和RCS年表的波动趋势更为一致。各年表与气候因子的相关分析表明,NEC年表和BAI年表对气候因子的响应特征较为一致,而RCS年表与气候因子的相关关系较弱,暗示NEC年表与BAI年表包含更多的气候信息。BAI法是将年轮宽度转化成断面积指数,不需要标准化来表征树木的生长趋势,避

免了NEC法在曲线拟合过程中的过度拟合^[28]或RCS方法的趋势扭曲^[29]等一系列误差,更适合于树木生长趋势的表达,广泛应用于树轮同位素的研究^[30]。结合年表统计特征分析,断面积修正法建立的年表更适合于贡嘎山峨眉冷杉生长趋势的拟合。

3.2 峨眉冷杉海拔分布上下限树木径向生长与气候因子的关系

三种年表与临近康定气象站气象数据的相关分析表明,无论是分布于海拔上限还是下限的峨眉冷杉,均以NEC与BAI年表对气候要素的响应较为一致,其中BAI年表对温度和降水的响应更为敏感。在峨眉冷杉海拔分布的下限,峨眉冷杉轮宽与前一年生长季(6~9月)温度呈显著负相关,表明前一年生长季温度对峨眉冷杉径向生长存在显著的滞后效应,这与黄土高原西部太和山地区的长白落叶松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)^[31]和蒙古国阿尔泰地区的红松(*Larix sibirica*)^[32]的研究结果相一致。一方面,前一年生长季温度的升高增加叶片和土壤的蒸腾作用,部分叶片气孔关闭,光合作用减弱,呼吸作用消耗更多的累积物质,引起峨眉冷杉生长减

弱^[33]。另一方面,前一年生长季与当年生长季连续的相对较高温更抑制峨眉冷杉的径向生长,出现显著的滞后效应。此外,峨眉冷杉与当年生长季(9月)温度呈负相关,这与川西高原地区的冷杉(*Abies faxoniana*)^[34]、川西米亚罗地区的岷江冷杉(*Abies faxoniana*)^[35]和长白山低海拔地区的长白落叶松(*Larix olgensis*)^[36]的研究相吻合。与多数低海拔地区降水是限制树木生长的主要因子不同^[37],在峨眉冷杉海拔分布的下限,降水量充足,水分对峨眉冷杉的影响较小,因此生长季温度可能是影响峨眉冷杉生长的主要限制因子。

在海拔 3600 m,由于生长季较短(7~9月),生长季温度的升高可促进峨眉冷杉生长,树木径向生长与当年 7 月温度呈极显著相关关系($P < 0.01$),这与段建平^[38]贡嘎山东坡峨眉冷杉的研究一致,在其它山地森林海拔分布上限的研究也得到相似的结果^[10,39]。由于该海拔是峨眉冷杉林线处,生长季温度的升高有利于冬季积雪的融化,促进光合作用、细胞分裂和树干物质累积,形成更宽的树木年轮^[40]。同时,前一年 7 月和 9 月的温度对峨眉冷杉的生长也存在显著的滞后效应。峨眉冷杉径向生长与当年 5 月降水呈正相关,这与柴达木盆地东北缘祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)的研究结论一致^[41],5 月是林线峨眉冷杉的生长季前期,降水的增加有利于根系活动,形成层活动提前,促进峨眉冷杉的生长。此外,峨眉冷杉的生长还与前一年 9 月的降水呈显著负相关,7~9 月是贡嘎山海螺沟地区降水最集中最多的时期,云层覆盖厚,过多的降水反而不利于峨眉冷杉的光合作用等生理活动。许多研究认为,温度是控制高海拔地区树木生长的主要因子^[42],本研究结果表明,峨眉冷杉林线树木径向生长主要受水热条件耦合的同步控制,可能与样地微生境的差异有关。此外,与干旱区不同,该区域气候湿冷,温度可能不是控制峨眉冷杉径向生长的唯一因子。再者,选取的气象数据来自康定气象站,虽与贡嘎山观测站近 20 年来的气象数据存在一致性,但林线处的强风以及其它干扰可能会引起局地气候环境变化,进而导致气象站代表的区域气候存在差异。

3.3 峨眉冷杉海拔分布上下限树木径向生长对气候变暖的响应

图 2 表明,1950 年以来气温显著上升,峨眉冷杉海拔分布上下限的树木断面积指数在 1950 年之后变化趋势不同,说明峨眉冷杉海拔分布上下限树

木对气候变暖存在不同的响应模式。滑动相关分析显示,海拔分布下限峨眉冷杉对温度的负响应随时间逐渐加强,气温上升显著限制了下限峨眉冷杉的径向生长(图 5)。相关分析显示,该海拔峨眉冷杉的径向生长与生长季温度尤其是 9 月的温度以及前一年 6~9 月温度呈显著负相关(图 4)。较高的 9 月的高温导致土壤和叶片的蒸腾作用加强,树干物质累积减少,引起断面积指数随着气温的升高而逐渐下降,如果该海拔的气温持续上升,尤其是 9 月的气温上升,加上前一年生长季高温的累计效应,可能导致峨眉冷杉的径向生长进一步减弱,同时可能增加部分峨眉冷杉树木死亡率,影响该海拔峨眉冷杉的分布,使分布下限的峨眉冷杉在海拔上发生上移。相对于峨眉冷杉海拔分布下限,随着气温和降水升高,林线峨眉冷杉断面积指数在 1980 年左右出现生长分离现象。1950—1980 年是峨眉冷杉生长的衰退期,此时温度和降水的变化并不显著;1980 年后峨眉冷杉轮宽呈显著上升,气温升高有利于高海拔寒冷地区树木的生长,这与同为针叶林的红松研究结果相一致^[43]。相关分析显示,峨眉冷杉径向生长与当年 7 月温度呈显著正相关,7 月正值林线峨眉冷杉生长的旺盛时期,温度的升高会促进光合作用等生理活动,导致断面积指数显著上升。7 月气温的升高,可能加快峨眉冷杉径向生长,进而林线峨眉冷杉向高海拔上移。峨眉冷杉分布范围不仅受温度和降水的影响,还受土壤、湿度、干扰、竞争等环境因子的影响,对于峨眉冷杉分布的上下限是否会发生上移,还有待进一步深入的研究。

4 结论

(1) 三种拟合方法建立的年表的各统计值有所差异,林线对气候因子更加敏感,同时 BAI 年表和 NEC 年表的统计值要大于 RCS 年表,包含更多环境信息。

(2) 三种年表的峨眉冷杉分布趋势较为一致,近 60 年来,峨眉冷杉海拔分布下限均呈现生长衰退趋势;林线峨眉冷杉的生长趋势可以分为两个阶段,其中 1950—1980 年生长衰退,1980 年以后生长加速。

(3) 三种年表与气候因子的相关关系存在差异,NEC 和 BAI 年表对温度和降水的响应较为一致,但 BAI 年表对温度和降水的响应更为敏感。在

贡嘎山地区,BAI 年表更适合于峨眉冷杉生长趋势的拟合。

(4)峨眉冷杉海拔分布下限与上一年 6~9 月温度呈显著负相关,且具有显著的滞后效应,但与降水的相关关系不显著,温度可能是影响峨眉冷杉海拔分布下限树木生长的主要因子。林线峨眉冷杉与当年 7~9 月温度以及当年 4~6 月降水存在正相关,且随着时间变化相关关系增强,但与当年 7~9 月的降水存在负相关,当年 7 月温度和 5 月降水可能是影响林线峨眉冷杉分布的主要限制因子。

参考文献 (References)

- [1] PAN Y, BIRDSEY R A, FANG J, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, **333** (6045): 988–993.
- [2] BONAN G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008, **320** (5882): 1444–1449.
- [3] GATES D M. Climate change and forests [J]. *Tree Physiology*, 1990, **7**(1–2–3–4): 1–5.
- [4] 李伟,王秋华,沈立新. 气候变化对森林生态系统的影响及应对气候变化的森林可持续发展[J]. *林业调查规划*, 2014, **39**(1): 94–97 [LI wei, WANG Qihua, SHEN lixin. Impact of climate change on forest ecosystems and countermeasures of sustainable forest development [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2014, **39** (1): 94–97]
- [5] KRAMER K, LEINONEN I, LOUSTAU D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2000, **44** (2): 67–75.
- [6] BERTRAND A, CASTONGUAY Y. Plant adaptation to overwintering stresses and implications of climate change [J]. *Canadian Journal of Botany*, 2003, **81**(12): 1145–1152.
- [7] VAN MANTGEM P J, STEPHENSON N L. Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest [J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(10): 909–916.
- [8] 颜廷武,尤文忠. 森林生态系统应对气候变化响应研究综述 [J]. *环境保护与循环经济*, 2011, **30**(12): 70–73 [YAN Tingwu, YOU Wenzhong. A Review of response of forest ecosystem to climate change [J]. *Environmental Protection & Re-Cycling Economy*, 2011, **30**(12): 70–73]
- [9] BOWMAN D M J S, BRIENEN R J W, GLOOR E, et al. Detecting trends in tree growth: not so simple [J]. *Trends in plant science*, 2013, **18**(1): 11–17.
- [10] PONOCNÁ T, SPYT B, KACZKA R, et al. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe [J]. *Trees*, 2016, **30**(5): 1633–1646.
- [11] BAREFOOT A C, WOODHOUS L B, HAFLEY W L, et al. Developing a dendrochronology for Winchester, England [J]. *Journal of the Institute of Wood Science*, 1974, **6**(5): 34–40.
- [12] 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 bulletin*, 1981, **41**:45–53.
- [13] KUUSELA K, KILKKI P. Multiple regression of increment percentage on other characteristics in scotch-pine stands [J]. *Acta Forestalia Fennica*, 1963, **75**(4):1–40.
- [14] WANG G G, CHHIN S, BAUERLE W L. Effect of natural atmospheric CO₂ fertilization suggested by open-grown white spruce in a dry environment [J]. *Global Change Biology*, 2006, **11**(3): 601–610.
- [15] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京:气象出版社,1990: 138–144 [WU Xiangding. *Tree Ring and Climate*. Beijing: Meteorological Press, 1990: 138–144]
- [16] COLE C T, ANDERSON J E, LINDROTH R L, et al. Rising concentrations of atmospheric CO₂ have increased growth in natural stands of quaking aspen (*Populus tremuloides*) [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(8): 2186–2197.
- [17] MELVIN T M, BRIFFA K R. A “signal-free” approach to dendroclimatic standardization [J]. *Dendrochronologia*, 2008, **26** (2): 71–86.
- [18] PHIPPS R L, WHITON J C. Decline in long-term growth trends of white oak [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, **18** (1): 24–32.
- [19] VAN DER SLEEN P, GROENENDIJK P, VLAM M, et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO₂ fertilization but water-use efficiency increased [J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(1): 24–28.
- [20] HELAMA S. Expressing tree-ring chronology as age-standardized growth measurements [J]. *Forest Science*, 2015, **61**(5): 817–828.
- [21] COOK E R, BRIFFA K R. A comparison of some tree-ring standardization methods [J]. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, 1990: 153–162.
- [22] 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.
- [23] 羊留冬,王根绪,杨燕,等. 贡嘎山峨眉冷杉成熟林凋落物量动态研究[J]. *江西农业大学学报*, 2010, **32**(6): 1163–1167 [YANG Liudong, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Dynamics of litter fall in *Abies fabric* mature forest at Gongga Mountain [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, **32**(6): 1163–1167]
- [24] 羊留冬,杨燕,王根绪,等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31** (13): 3668–3676 [YANG Liudong, YANG Yan, WANG Genxu, et al. Short-term effects of warming on growth and stoichiometrical characteristics of *Abies fabiri* (Mast.) Craib seedling in Gongga Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(13): 3668–3676]

- [25] 冉飞,梁一鸣,杨燕,等. 贡嘎山雅家埂峨眉冷杉林线种群的时空动态[J]. 生态学报,2014,34(23):6872-6878 [RAN Fei, LIANG Yiming, YANG Yan, et al. Spattial-temporal dynamics of an *Abies fabri* population near the alpine treeline in the Yajiageng area of Gongga Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6872-6878]
- [26] 宿以明,刘兴良. 峨眉冷杉人工林分生物量和生产力研究[J]. 四川林业科技,2000,21(2):31-35 [XIU Yiming, LIU Xinliang. Biomass and productivity of *Abies fabri* plantation [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2000, 21(2): 31-35]
- [27] 钟祥浩,罗辑,吴宁. 贡嘎山森林生态系统研究[M]. 成都科技大学出版社,1997:5-6 [ZHONG Xianghao, LUO Ji, WU Ning. Researches of the forest ecosystems on Gongga Mountain [M]. Chengdu University of Science and Technology Press, 1997: 5-6]
- [28] 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(5): 2040-2054.
- [29] 方克艳,刘昶智,勾晓华,等. 树轮学的一些基本研究方法和存在的问题[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(5):41-46 [FANG Keyan, LIU Changzhi, GOU Xiaohua, et al. Some methods in dendrochronology and potential problems with them [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(5): 41-46]
- [30] SILVA L C R, ANAND M, LEITHEAD M D. Recent widespread tree growth decline despite increasing atmospheric CO₂ [J]. PLoS One, 2010, 5(7): e11543.
- [31] MA Y, LIU Y, SONG H, et al. A-standardized precipitation evapotranspiration index reconstruction in the Taihe Mountains using tree-ring widths for the last 283 Years [J]. PLoS one, 2015, 10(7): e0133605.
- [32] DULAMSUREN C, KHISHIGJARGAL M, LEUSCHNER C, et al. Response of tree-ring width to climate warming and selective logging in larch forests of the Mongolian Altai [J]. Journal of Plant Ecology, 2014, 7(1): 24-38.
- [33] LIU H, PARK WILLIAMS A, 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.
- [34] 郭滨德,张远东,王晓春. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异[J]. 应用生态学报,2016,27(2):354-364 [GUO Binde, ZHANG Yuandong, WANG Xiaochun. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slop aspects to rapid warming in western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 354-364]
- [35] XU N, WANG X C, ZHANG Y D. Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 3742-3751.
- [36] 于健,徐倩倩,刘文慧,等. 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应[J]. 植物生态学报,2016,40(1):24-35 [YU Jian, XU Qianqian, LIU Wenhui et al. Response of radial growth to climate change for *Larix olgensis* along an altitudinal gradient on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 24-35]
- [37] 刘敏,毛子军,厉悦,等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应[J]. 应用生态学报,2016,27(5):1341-1352 [LIU Min, MAO Zijun, LI Yue, et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatical factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1341-1352]
- [38] 段建平,王丽丽,徐岩,等. 贡嘎山东坡不同海拔高度树轮宽度对气候变化的响应[J]. 地理研究,2010,29(11):1940-1949 [DUAN Jianping, WANG Lili, XU Yan, et al. Response of tree-ring width to climate change at different elevations on the east slope of Gongga Mountains [J]. Geographical Research, 2010, 29(11): 1940-1949]
- [39] SHRESTHA K B, HOFGAARD A, VANDVIK V. Tree-growth response to climatic variability in two climatically contrasting treeline ecotone areas, central Himalaya, Nepal [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(11): 1643-1653.
- [40] ZHANG H, SHAO X, ZHANG Y. Which climatic factors limit radial growth of Qilian juniper at the upper treeline on the northeastern Tibetan Plateau? [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(10): 1173-1182.
- [41] WANG W, LIU X, SHAO X, et al. Differential response of Qilian juniper radial growth to climate variations in the middle of Qilian Mountains and the northeastern Qaidam Basin [J]. Climatic Change, 2015, 133(2): 237-251.
- [42] 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 [ZHANG Hui, SHAO Xuemei, ZHANG Yong. Research progress on the response of radial growth to climatic factors at different altitudes [J]. Journal of Earth Environment. 2012, 3(3): 845-854]
- [43] YU D, LIU J, ZHOU L, et al. Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300(300): 96-105.

Radial Growth Features of *Abies Fabri* Craib Distributed in the Upper and the Lower Elevational Limits in Gongga Mountain and Its Relationship with Climatic Factors

JIA Min^{1, 2}, ZHU Wanze^{1*}, WANG Wenzhi¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on tree-ring width measurements of *Abies fabri* Craib distributed in the upper and the lower elevational limits in Hailuoguo, Gongga Mountain, the tree-ring chronologies were constructed by using three different detrending methods, including the negative index curve (NEC), the regional curve standardization (RCS) and the basal area increment (BAI). We combined temperature and precipitation data from neighboring Kangding meteorological station, to analyzed the response of radial growth in *A. fabri* to climatic factors in the different methods. The results showed that the chronology developed by BAI could more accurately characterize the growth trend of *A. fabri*. The correlation analysis between BAI chronology and monthly climatic factors indicating the radial growth in the lower elevational limits was negatively correlated with temperature from June to September in the previous year, and temperature was the main influencing factor in the lower elevational limits. Radial growth in the upper elevational limits was positively correlated with temperature in July of the current year, as well as precipitation in May of the current year. The coupling effect of temperature and precipitation was the main factor affecting the radial growth of *A. fabri* distributed in the upper elevational limits.

Key words: *Abies fabri* Craib; Radial growth; Detrending methods; Climatic factor