

引用格式: 史丰鸣, 杨睿, 石松林, 金亚宁, 管增艳. 川西南高山松径向生长对气候响应的时空分异特征[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 478-492.
SHI Fengming, YANG Rui, SHI Songlin, JIN Yaning, GUAN Zengyan. Spatio-temporal variability of radial growth of *Pinus densata* in responses to climate change in southwestern Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 478-492.

川西南高山松径向生长对气候响应的时空分异特征

史丰鸣^a, 杨睿^a, 石松林^{a,b*}, 金亚宁^a, 管增艳^a

(成都理工大学 a. 旅游与城乡规划学院; b. 四川省社会科学重点研究基地(扩展)国家公园研究中心, 成都 610059)

摘要: 气候变化从不同时空尺度上影响中国川西南山地亚高山森林生长。高山松(*Pinus densata*)作为高山地区的特有树种,是川西南山地亚高山针叶林的主要优势种或建群种。然而,目前有关高山松径向生长对气候变化响应的时空分异的研究仍有限,不利于全面了解川西南地区森林对气候变化的响应关系。为了探究不同生境下高山松生长对气候因子响应的特点及差异,本文以四川省木里县3个不同地点(鸭咀自然保护区、博窝乡坑古村、关机村)高山松为研究对象,采用树木年轮学方法,构建高山松树木年轮宽度指数标准年表和胸高断面面积增量序列,运用相关分析和滑动相关分析方法研究不同地点高山松径向生长与各气候因子之间的关系。结果表明:(1)不同区域高山松径向生长对气候变化的响应方式不一致;鸭咀自然保护区高山松径向生长主要受温度和生长季相对湿度限制,博窝乡关机村的高山松径向生长主要受7—8月的平均最低温度制约,而博窝乡坑古村的高山松径向生长主要受5—6月平均温度和相对湿度的影响。(2)不同区域高山松径向生长对气候响应的稳定性存在差异;鸭咀自然保护区高山松生长与温度正相关关系逐渐增加,关机村高山松径向生长与温度的负相关关系和干旱指数的正相关关系不断加强,而坑古村的高山松径向生长对温度响应的敏感性呈下降趋势。(3)1990年升温突变后,生长季温度升高对高山松径向生长影响具有明显的区域差异,促进鸭咀保护区树木生长,抑制关机村树木生长,而坑古村树木生长受温度影响较弱。未来气候变暖背景下,干旱生境下高山松生长更容易受到气候变暖的影响而导致生长衰退,湿润环境下高山松会表现出生长加速,从而潜在改变区域森林动态。本研究可为未来气候变化背景下高山松生长动态预测及区域森林的适应性管理提供科学依据。

关键词: 径向生长; 树木年轮; 气候变化; 高山松; 四川木里县

中图分类号: K903

文献标志码: A

以气候变暖为主要特征的环境变化从不同时空尺度上深刻影响着森林生长,进而改变森林生态系统的结构和功能^[1-3]。中国西南亚高山区域作为全球气候变化敏感的地区之一,区内森林生长受到气候变化的影响^[4]。有学者认为,该区域森林生长主要受低温限制,气候变暖将促进树木生长^[5];然而,相反的观点是,近几十年来温度升高引起的干旱胁迫已显著降低了区域内部分树种的生长,甚至导致

树木死亡^[6-7]。因此,进一步开展川西南亚高山森林生长对气候变化的响应研究,对深入理解和预测未来气候变化背景下区域森林生态适应性具有重要意义。

川西山地是中国西南地区重要的亚高山针叶林分布区,强烈地受到气候变化影响,其丰富的森林资源对于区域水源涵养、水土保持和生物多样性保护具有重要作用^[8]。川西地区树木生长对气候变化

收稿日期(Received date): 2022-12-07; 改回日期(Accepted date): 2023-08-17

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)。[Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0402)]

作者简介(Biography): 史丰鸣(1999-),男,河南漯河人,硕士研究生,主要研究方向:全球变化。[SHI Fengming (1999-), male, born in Luohe, Henan province, M. Sc. candidate, research on global change] E-mail: shifengming@stu.cdut.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 石松林(1986-),男,博士,副教授,主要研究方向:全球变化。[SHI Songlin (1986-), male, Ph. D., associate professor, research on global change] E-mail: shisonglin17@cdut.edu.cn

的响应具有明显的时空分异特征^[9-10],但已有研究仍存在以下不足:其一,自气候变暖以来,该区域树木生长对气候响应的敏感性呈现不同的趋势^[8,11-12],即“分异问题”。同时,不同区域同一树种生长对气候变化的响应敏感性也表现出一定程度的差异^[11,13-15]。然而,目前此类研究多集中于川西北地区,基本不涉及川西南区域。其二,高山松作为中国西部高山地区的特有树种,是川西山地亚高山针叶林的主要优势种或建群种,对区域森林生态系统的结构和功能起着重要的作用^[16]。已有高山松树木年轮学研究表明,高山松对气候变化的响应较为敏感^[17-19],其生长易受暖干化气候的影响^[18]。然而,有关高山松对气候变化的响应是否会出现区域差异和时间分异仍不清楚。

四川省凉山州木里藏族自治县,地处川西高原东南部,高山松在区域内大面积集中分布,区域气候暖干化现象显著。本文以木里县为典型研究区,设置3个典型样地,采用树轮生态学方法进行年轮样品采集、处理、测量与分析,探讨高山松径向生长动态及其对气候变化响应的时空分异特征,以期为准准确预测未来气候变化背景下高山松生长动态及区域森林的适应性管理提供科学依据。

1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山州木里藏族自治县(27°40′~29°10′N,100°03′~101°40′E),是云贵高原和青藏高原的过渡地带(图1),属典型的高原气候。据木里气象站(1960—2020年)气象数据统计,该区域年平均温度为14℃,最冷月(1月)最低温度为-4.6℃,最热月(6月)最高温度为30.4℃,年均降水量816.31mm,降水集中在6—9月,占全年总降水量的82%(图2)。自1990年以来,年平均温度、最低温度和最高温度分别以0.44、0.35、0.64℃/10a的速率上升,而降水、帕默尔干旱指数和相对湿度分别以-30.5mm/10a、-0.95/10a和-1.9%/10a的速率下降(图3),区域气候呈现出较为明显的暖干化趋势。区域森林植被类型以川滇冷杉(*Abies forrestii*)、川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)和高山松等亚高山森林为主。

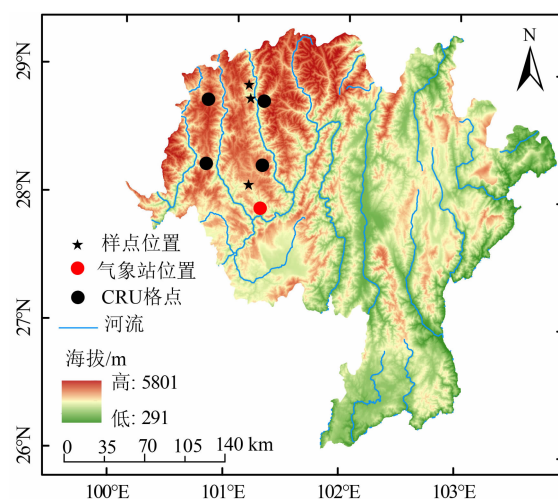


图1 树木年轮采样点和气象站地理位置

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

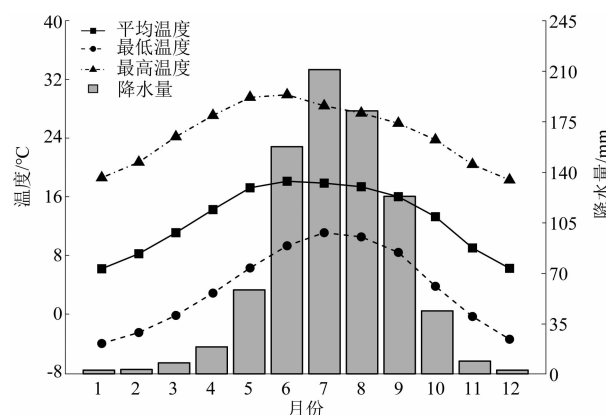


图2 1960—2019年木里气象站月平均温度、最低温度、最高温度和月降水量

Fig. 2 Monthly mean temperature, minimum temperature, maximum temperature and precipitation at the Muli meteorological station from 1960 to 2019

1.2 样品采集及年表建立

在2020年8月和2021年7月期间,分别在鸭咀自然保护区(MLYZ)、博窝乡关村(BWGJ)和博窝乡坑古村(BWKG)高山松林集中分布区各设置1个典型样地,样地经纬度、海拔、坡向和坡度等信息见表1。样地土壤类型均为山地棕壤,土层厚度为60~100cm。三个样地乔木层均以高山松为建群种且占绝对优势,其中MLYZ高山松林主要由高山松、川滇高山栎和云南杜鹃(*Rhododendron yunnanense*)组成,高山松平均胸径为34.5cm,平均高度为24.5m;BWGJ高山松林主要由高山松、川滇高山栎、大白杜鹃(*Rhododendron decorum*)、毛叶珍珠花(*Lyonia villosa*)组成,高山松平均胸径为33.9cm,

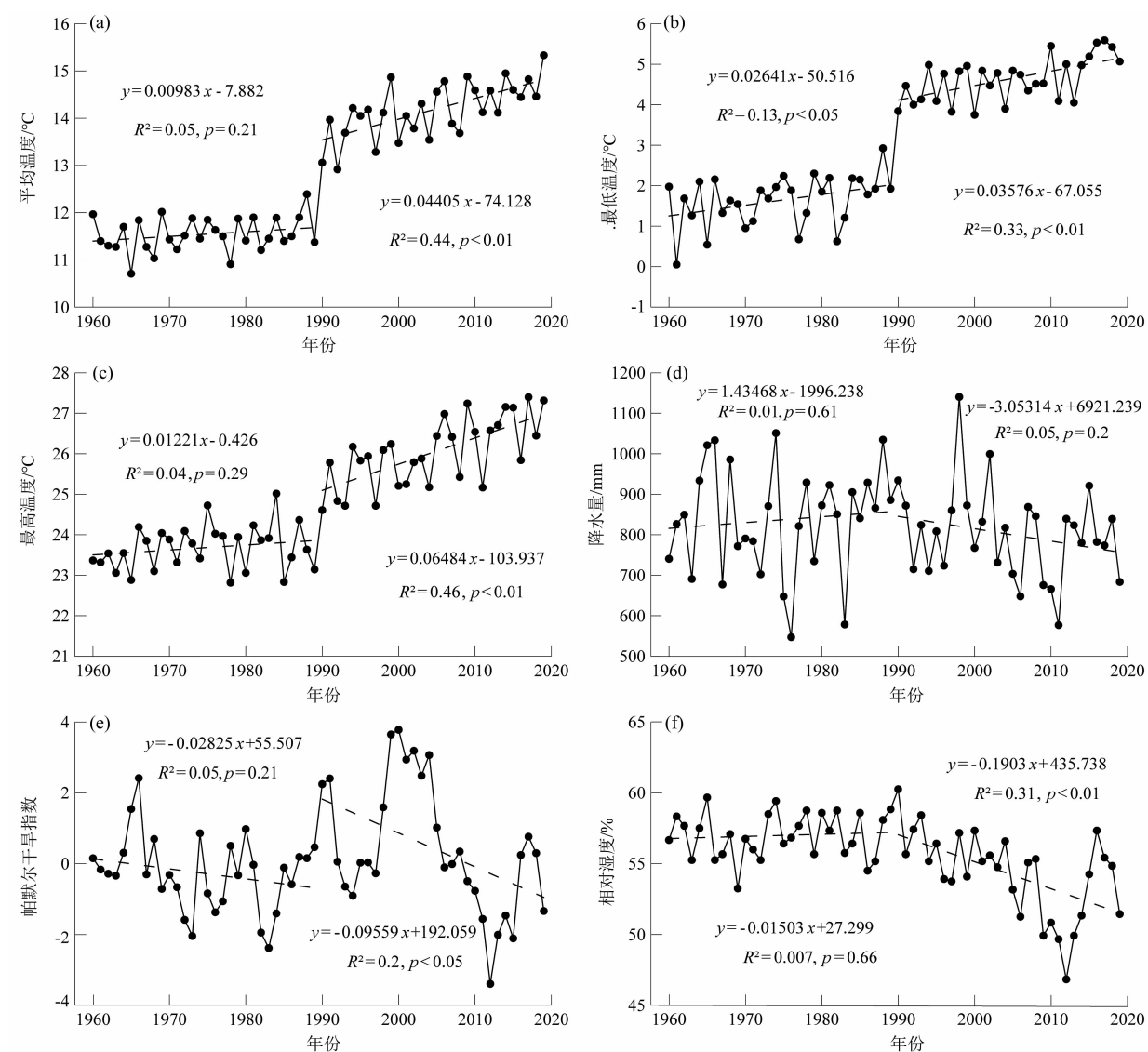


图 3 木里县年气候因子年际变化趋势：
(a) 平均温度；(b) 最低温度；(c) 最高温度；(d) 总降水量；(e) 帕默尔干旱指数；(f) 相对湿度
Fig. 3 Inter-annual trends in climatic factors in Muli county: (a) mean temperature; (b) minimum temperature; (c) maximum temperature; (d) total precipitation; (e) average of the four grids data of the Palmer Drought Severity Index; (f) relative humidity

表 1 采样点信息及年表统计特征
Tab 1 Description of sampling sites and tree-ring chronology

采样点	经纬度	坡向	坡度/(°)	海拔/m	样本量	树间相 关系数	平均 敏感度	信噪比	样品总体 代表性
BWGJ	101°08'08"E,28°54'01"N	SE	6	3675	74	0.32	0.25	14.92	0.93
BWKG	101°09'17"E,28°47'36"N	SE	3	3312	39	0.28	0.23	7.91	0.89
MLYZ	101°09'32"E,28°06'55"N	SW	16	3333	70	0.34	0.14	18.12	0.95

平均高度为 24.4 m; BWKG 高山松林主要由高山松、川滇高山栎、云南杜鹃和大白杜鹃组成,高山松平均胸径为 48.8 cm,平均高度为 25.3 m。使用生长锥对样地内所有高山松个体(胸径≥5 cm)在胸高位置分别沿平行和垂直山坡方向各钻取一根树

芯,将采集到的树芯装入塑料管保存并带回实验室。在实验室内,用白乳胶将树芯固定在木槽上,自然风干后使用不同目数的砂纸对树芯进行打磨,直至年轮清晰可见。将打磨好的树芯置于显微镜下进行交叉定年,用精度为 0.01 mm 的 LINTAB 6.0 年轮宽

度测量仪逐年测量年轮宽度并校准,最后使用 COFFCHA 程序检验测量结果,并剔除未通过程序检验、质量较差的样芯序列。

使用 R 语言 dplR 包中修正的负指数函数^[20] (Modified Negative Exponential Curve, ModNegExp) 和区域曲线标准化^[21] (Regional Curve Standardization, RCS) 方法对年轮宽度序列进行去趋势处理,分别建立标准年表 (Standard Tree-ring Chronology, STD) 和 RCS 年表。此外,使用断面积增量^[22] (Basal Area Index, BAI) 计算高山松树本年生长量并建立 BAI 年表:

$$BAI = \pi(R_t^2 - R_{t-1}^2) \quad (1)$$

式中, R_t 和 R_{t-1} 分别为第 t 年和第 $t-1$ 年对应的年轮半径。

年表统计信息表明(表 1),三个地点高山松样品总体代表性 (Expressed population signal, EPS) 均超过 0.85,表明样本基本能够代表总体特征。平均敏感度 (Mean sensitivity, MS) 分别为 0.25、0.23 和 0.14,信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR)

分别为 14.92、7.91 和 18.12,说明三个地点高山松受气候变化影响较大且保留了较丰富的气候信息。总体来说,高山松年表特征满足年轮气候分析的要求。

如图 4 所示,三种年表均表现出相似的变化趋势 ($p < 0.01$),而 BAI 年表具有敏感性高且精确性好的特点^[23]。因此,本文中使用的 BAI 年表研究高山松生长与气候因子的关系。STD、RCS 和 BAI 序列均由 R 语言 dplR 包^[20] 计算得出。

1.3 气象资料

气象数据选择距采样点最近的木里气象站 (27°93'N, 101°26'E) 1960—2019 年的平均温度、最高温度、最低温度、降水量和相对湿度数据,器测数据从中国气象数据共享服务网 (<https://www.data.cma.cn/>) 获取。同时,为了更好地对比不同样地的气候差异以及分析高山松径向生长与水热条件的关系,从 KNMI Climate Explorer 网站 (<http://climexp.knmi.nl/>) 选取离采样点较近的 4 个栅格点平均温度、降水量和帕默尔干旱指数 (Palmer Drought

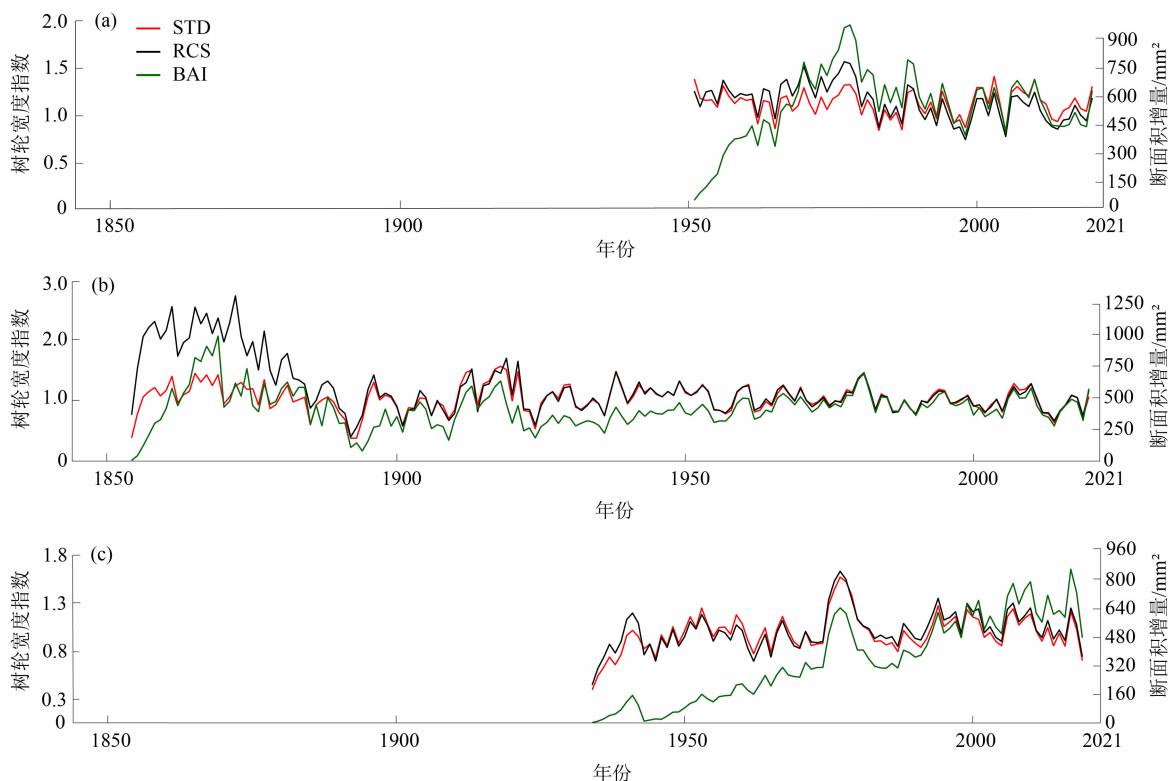


图 4 木里县高山松 STD 年表、RCS 年表和 BAI 年表:(a) BWGJ 年表;(b) BWKG 年表;(c) MLYZ 年表

Fig. 4 *Pinus densata* radial growth variations derived from the conservative detrending (STD), regional curve standardization (RCS) and basal area increment (BAI) detrending methods in Muli: (a) chronologies of BWGJ; (b) chronologies of BWKG; (c) chronologies of MLYZ

Severity Index, PDSI)。CRU 气象数据显示,鸭咀地区年平均温度、3 月和 10 月平均温度分别比博窝地区高 3.1 °C、3.5 °C 和 2.97 °C,同时,鸭咀地区生长季(6—9 月)降水量也比博窝地区高 51 mm。总体上,相比博窝地区,鸭咀地区气候条件更为温暖湿润。

1.4 数据处理、分析与作图

三个样点高山松最大树龄为 168 a,但由于该地区从 20 世纪 60 年代开始才有器测数据记录,因此本次研究采用 1960—2019 年的高山松年表与气象数据进行分析。由于树木生长受到前一年和当年气候条件的共同影响,即树木生长与气候因子存在“滞后效应”^[24],使用 R 语言对前一年 6 月到当年 9 月的气候因子与高山松年表进行相关分析。同时,为了揭示高山松生长对气候响应的稳定性,使用 R 语言

treeclim 包^[25]以 35 a 为滑动窗口,对高山松年表与气候因子进行滑动相关分析。

本研究数据分析与作图均由 R 语言(R 4.0.5)完成。

2 结果与分析

2.1 径向生长与气候因子的关系

通过对高山松年表与月尺度气候因子进行相关分析发现(图 5),BWGJ 高山松与前一年 7 月到当年 5 月、当年 7 月和 9 月的平均温度,前一年 7—9 月、当年 2 月和当年 7—8 月的平均最低温度,前一年 9—10 月、当年 4—5 月的平均最高温度均呈显著负相关($p < 0.05$)。BWKG 高山松与前一年 9 月平

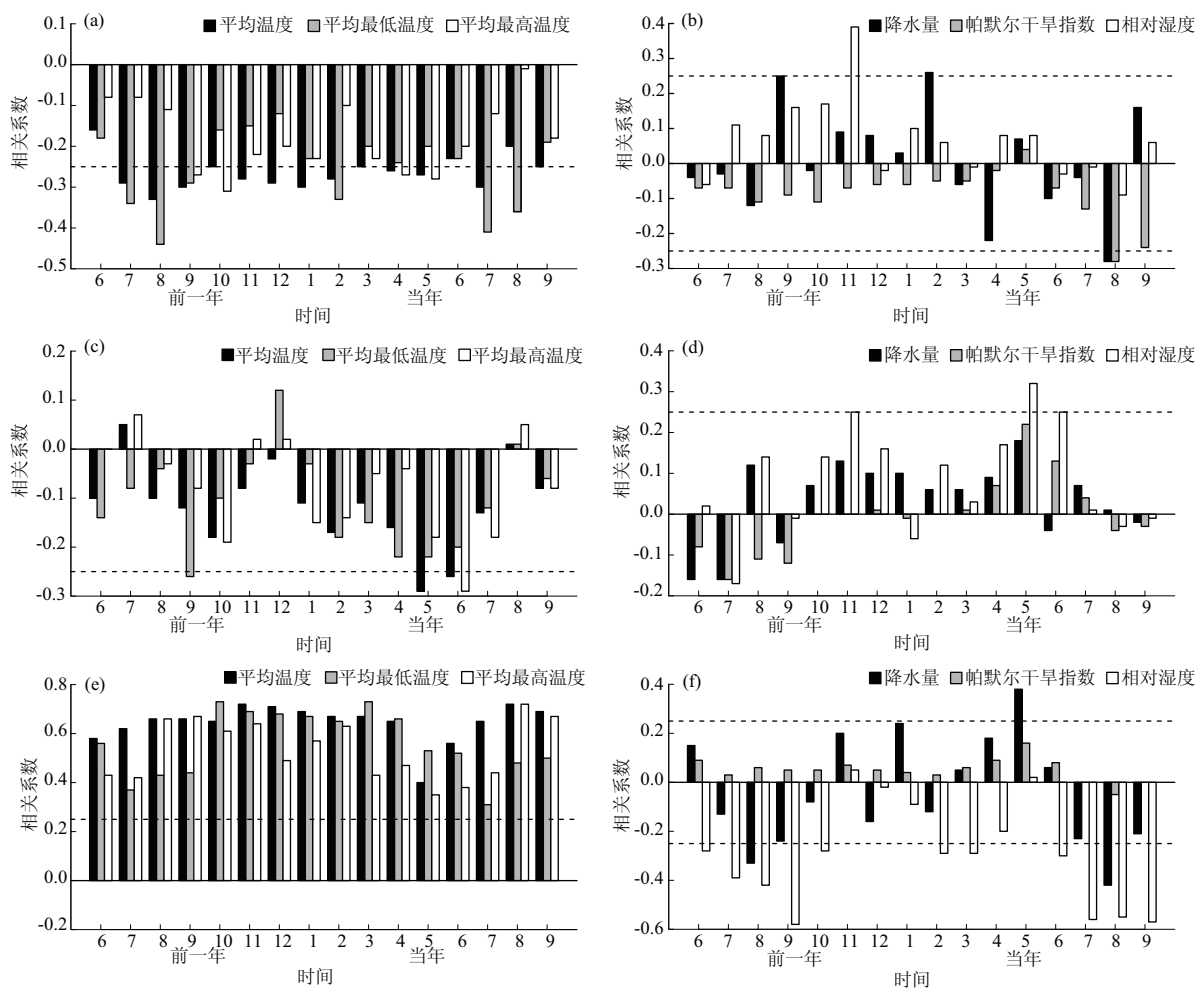


图 5 三个地点高山松断面积增量(BAI)与各月尺度气候因子(平均温度、平均最低温度、平均最高温度、降水量、帕默尔干旱指数和相对湿度)的相关关系:(a)和(b)BWGJ 高山松;(c)和(d)BWKG 高山松;(e)和(f)MLYZ 高山松

Fig. 5 Correlation coefficients of *Pinus densata* basal area increment (BAI) with monthly climatic factors (mean temperature, mean minimum temperature, mean maximum temperature, total precipitation, Palmer Drought Severity Index and relative humidity) at the three sites: (a) and (b) *Pinus densata* of BWGJ; (c) and (d) *Pinus densata* of BWKG; (e) and (f) *Pinus densata* of MLYZ

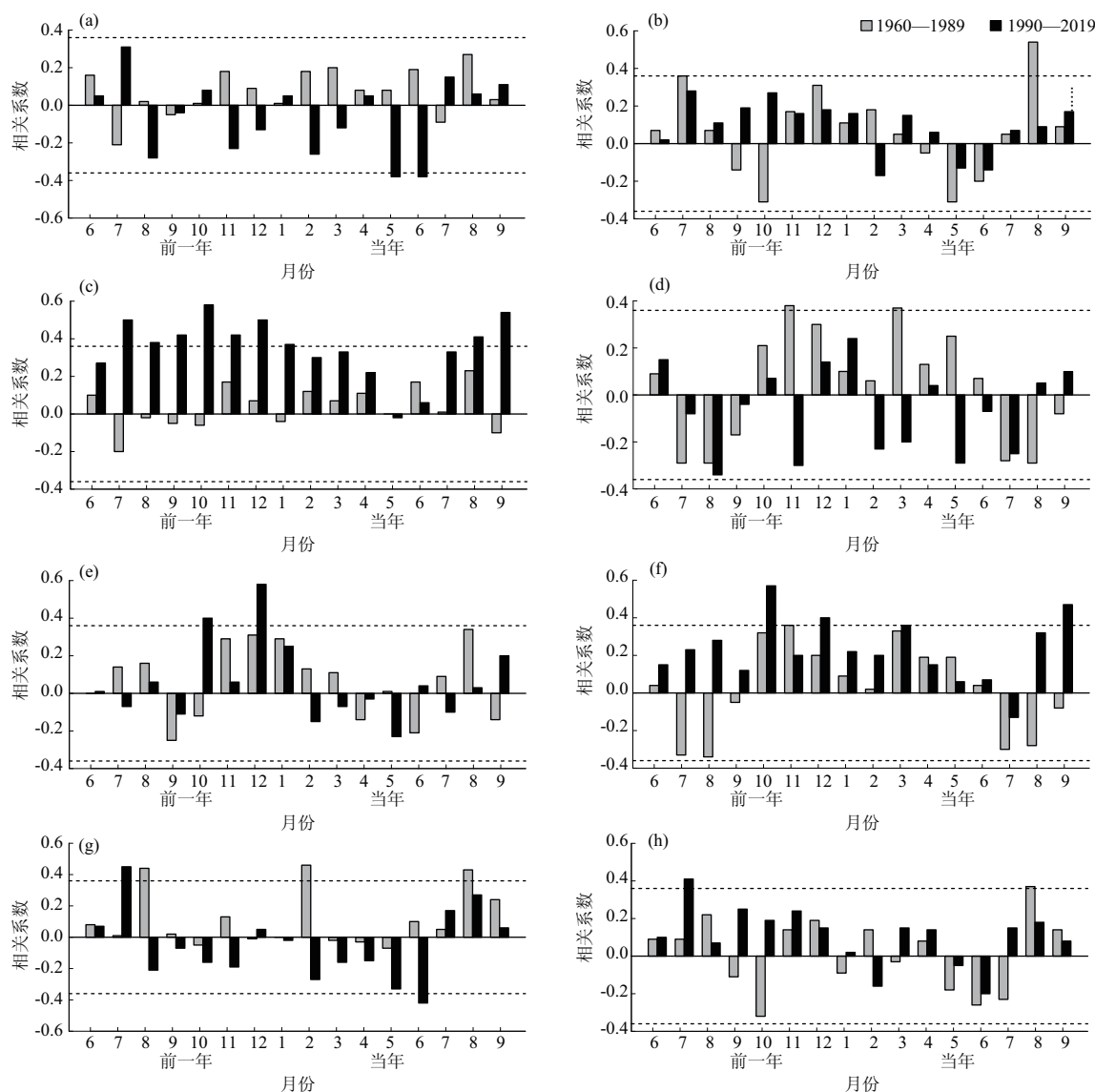
注:图中虚线代表达到 0.05 显著性水平,下同。

均最低温度、当年6月平均最高温度、当年5—6月平均温度均表现为显著负相关关系($p < 0.05$)。MLYZ高山松与前一年6月到当年9月的平均温度、平均最低温度和平均最高温度呈显著正相关($p < 0.01$)，MLYZ高山松与前一年10月和当年3月平均最低温度的相关性最强，相关系数均为0.73。这表明温度升高对BWGJ和BWKG高山松生长产生消极影响，而对MLYZ高山松生长产生积极作用。此外，对高山松年表与水分因子进行相关分析发现，BWGJ高山松与前一年9月和当年2月的降水、前一年11月相对湿度呈显著正相关($p < 0.05$)，与当年8月降水和PDSI呈显著负相关($p < 0.05$)；BWKG高山松与当年5—6月相对湿度呈显著正相关($p < 0.05$)；MLYZ高山松与8月降水、前一年6—10月、当年2—3月和6—9月相对湿度呈显著

负相关($p < 0.05$)，与当年5月降水呈显著正相关($p < 0.01$)，这表明生长季初期(5—6月)较高的湿度对BWKG高山松生长起着重要作用，生长季中期(8月)较高的降水量会抑制BWGJ和MLYZ高山松的生长。

2.2 升温前后径向生长-气候因子关系变化

BWGJ高山松在1960—1989年时间段内多与温度表现为正相关关系(图6)，与前一年8月、当年2月和8月平均最高温度相关性达到显著水平($p < 0.05$)，但在1990—2019年时段内与上述月份表现为不相关，而与当年5—6月平均温度、当年6月平均最高温度呈现出显著负相关($p < 0.05$)。此外，在前一时间段内，BWGJ高山松与当年8月降水呈显著负相关($p < 0.05$)，而在后一阶段与当年7月降水呈显著负相关($p < 0.05$)，并与当年1月降水



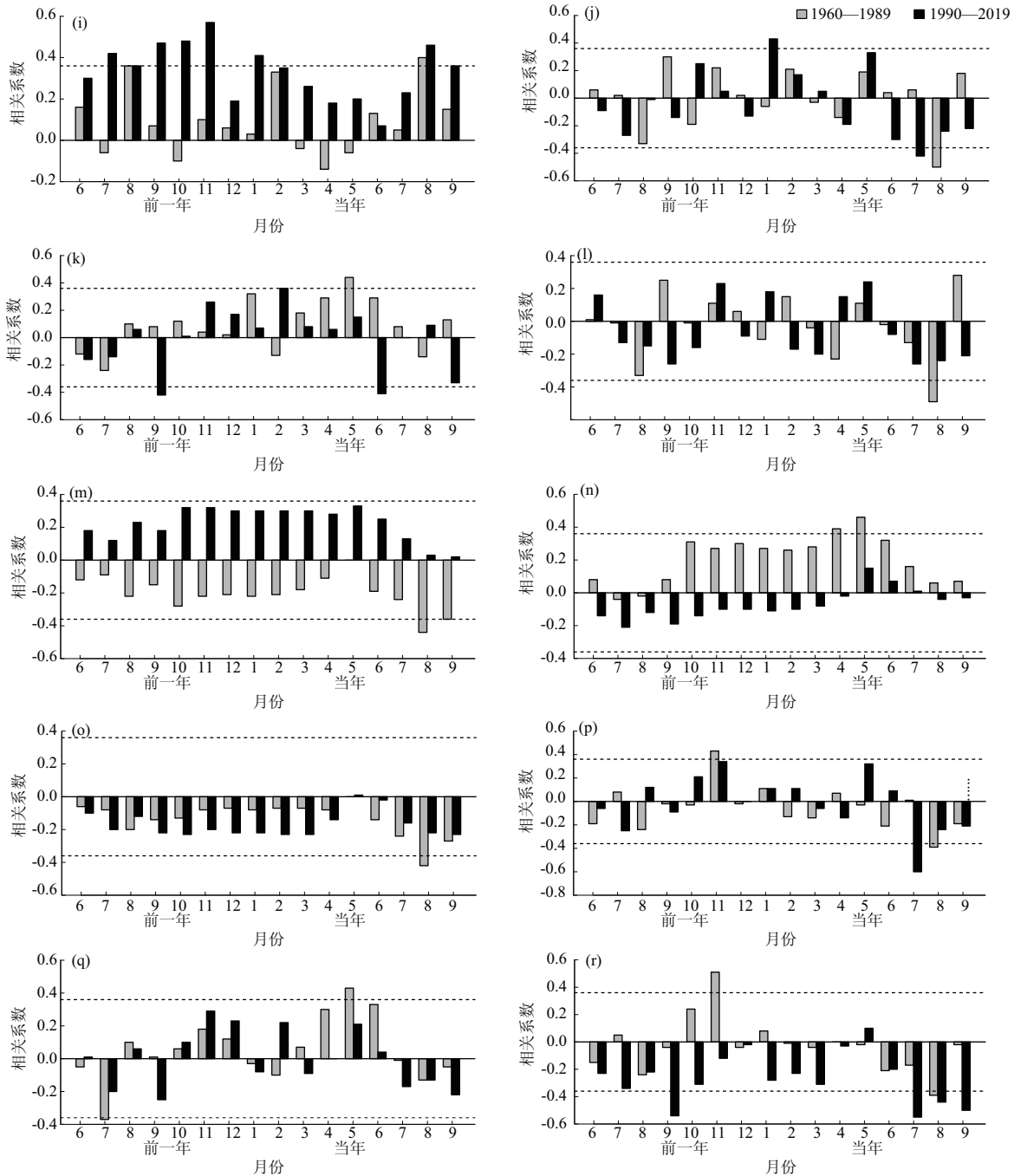


图 6 升温前后三个地点高山松径向生长与平均温度、平均最低温度、平均最高温度、降水量、帕默尔干旱指数和相对湿度的相关关系：
(a)、(d)、(g)、(j)、(m)和(p)BWGJ 高山松；(b)、(e)、(h)、(k)、(n)和(q)BWKG 高山松；(c)、(f)、(i)、(l)、(o)和(r)MLYZ 高山松

Fig. 6 Correlation coefficients between BAI chronologies of *Pinus densata* and monthly mean temperature, mean minimum temperature, mean maximum temperature, precipitation, Palmer Drought Severity Index and relative humidity; (a), (d), (g), (j), (m) and (p) *Pinus densata* of BWGJ; (b), (e), (h), (k), (n) and (q) *Pinus densata* of BWKG; (c), (f), (i), (l), (o) and (r) *Pinus densata* of MLYZ
注：(a)、(b)和(c)表示高山松与平均温度的关系；(d)、(e)和(f)表示高山松与平均最低温度的关系；(g)、(h)和(i)表示高山松与平均最高温度的关系；(j)、(k)和(l)表示高山松与降水量的关系；(m)、(n)和(o)表示高山松与帕默尔干旱指数的关系；(p)、(q)和(r)表示高山松与相对湿度的关系。

呈显著正相关($p < 0.05$)。在 1960—1989 年间, BWGJ 高山松径向生长与当年 8 月 PDSI 呈显著负相关($p < 0.01$),但在 1990—2019 年间转为正相关。

此外,升温后,BWGJ 高山松与前一年 11 月和当年 8 月相对湿度的相关性下降,与当年 7 月相对湿度呈显著负相关($p < 0.01$)。这表明升温后生长季初期

温度对 BWGJ 高山松的抑制作用增加,同时干旱胁迫对其径向生长的抑制作用也在逐渐增强。

在 1960—1989 年时段内,BWKG 高山松与前一年 7 月平均温度、当年 8 月平均温度和平均最高温度呈显著正相关($p < 0.05$),而在 1990—2019 年内,与前一年 10 月和 12 月平均最低温度、前一年 7 月平均最高温度呈显著正相关($p < 0.05$)。此外,升温前 BWKG 高山松与当年 5 月降水呈显著正相关($p < 0.05$),升温后则与当年 2 月降水呈显著正相关($p < 0.05$),且与前一年 9 月和当年 6 月降水呈显著负相关($p < 0.05$)。这表明升温后 BWKG 高山松受上一年生长季末温度和当年生长季降水影响正逐

渐增强。

1990 年升温后,MLYZ 高山松径向生长与温度的敏感性明显增加,与多个月份的平均温度、平均最低温度和平均最高温度均呈显著正相关($p < 0.05$)。升温后,MLYZ 高山松径向生长与前一年 11 月相对湿度由显著正相关($p < 0.05$)转为负相关,与前一年 9 月、当年 7—9 月相对湿度呈显著负相关($p < 0.05$)。这表明温度升高对 MLYZ 高山松生长的促进作用在逐渐增强。

高山松个体生长与气候因子相关分析结果表明(图 7),自 1990 年以来,BWGJ、BWKG 和 MLYZ 高山松与 7—9 月平均温度呈显著正相关的比例分别

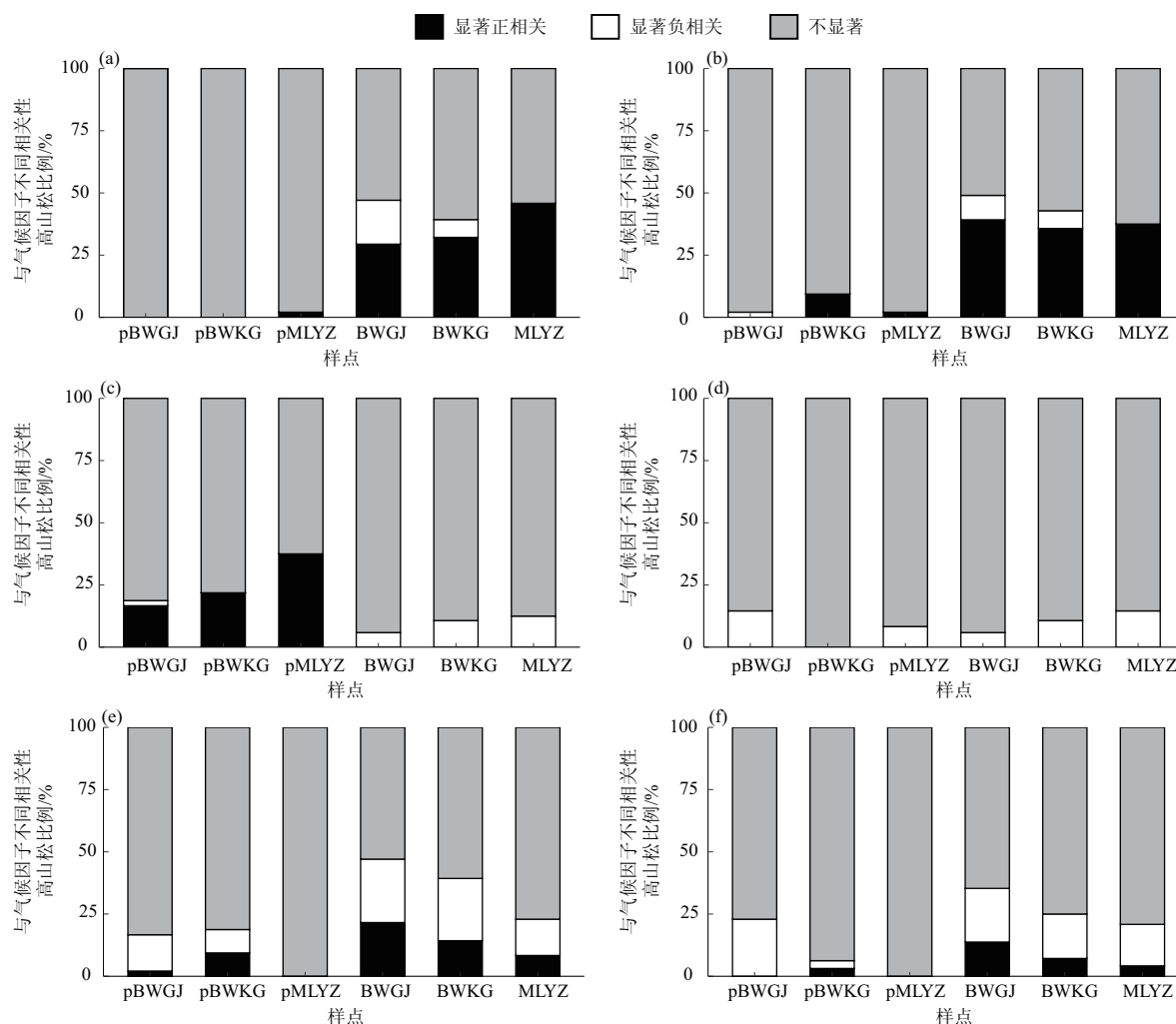


图 7 高山松与各气候因子显著正相关、显著负相关和不显著相关的比例:

(a) 和 (b) 平均温度; (c) 和 (d) 降水; (e) 和 (f) 帕默尔干旱指数

Fig. 7 Proportional contributions of *Pinus densata* positively, negatively and not significantly correlation with each climatic factor:

(a) and (b) mean temperature; (c) and (d) precipitation; (e) and (f) Palmer Drought Severity Index

注: p 表示 1960 年到 1989 年; (a)、(c) 和 (e) 分别表示高山松与前一年 9—12 月平均温度、降水量和帕默尔干旱指数的关系; (b)、(d) 和 (f) 表示高山松与当年 7—9 月平均温度、降水量和帕默尔干旱指数的关系。

由 0%、9.3% 和 2% 增加至 39.2%、35.7% 和 37.5%。同时,三个样地高山松与 7—9 月 PDSI 呈显著正相关的比例也有所增加,其中 BWGJ 增加了 13.7%,增长幅度最大。在 1990—2019 年期间,BWGJ、BWKG 和 MLYZ 高山松与前一年 9—12 月平均温度呈显著正相关的比例分别增加 29.4%、32.1% 和 43.8%,同时三个样点高山松与前一年 9—12 月降水呈正相关的比例均下降为 0,而与降水呈显著负相关的比例均上升。此外,BWGJ、BWKG 和 MLYZ 高山松与前一年 9—12 月 PDSI 呈显著正相关的比例分别增加 19.5%、4.9% 和 8.3%,同时,显著负相关比例也呈增加趋势。这表明温度升高可以促进种群内部分个体的生长,而前一年生长季末的降水则会抑制种群内部部分个体的生长。

2.3 径向生长对气候响应的稳定性

为揭示高山松径向生长与气候因子的动态关系,本研究对 BWGJ、BWKG 和 MLYZ 三个地点高山松 BAI 年表与气候因子进行滑动相关分析(35 a 窗口)。结果表明,BWGJ 高山松与前一年 9 月降水由显著正相关转变为不显著正相关,与当年 4 月和 8 月降水的显著性水平不断下降,与前一年 8 月、前一年 11 月、当年 2 月和当年 5—6 月平均温度由正相关转为负相关,显著性水平不断增加,与 PDSI 的相关系数在 1996 年前后由负相关转变为正相关,且显著性呈现逐渐增强的趋势,这表明温度升高会抑制 BWGJ 高山松的生长。BWKG 高山松与前一年 7 月和 12 月平均温度的敏感性呈减弱趋势,而与前一年 9 月降水负相关关系不断增强,与前一年 7—9 月 PDSI 由显著负相关($p < 0.05$)转为负相关关系。MLYZ 高山松与前一年 6 月到当年 4 月、当年 7—9 月平均温度的正相关关系表现为显著增强趋势,与前一年 9 月和当年 7 月降水的负相关关系也逐渐增加,这表明温度升高将促进 MLYZ 高山松的径向生长。

3 讨论

3.1 高山松径向生长对气候变化的响应特征

川西南地区受到西风急流南支和西南季风的共同作用^[26],位于西南坡的 MLYZ 样地夏季受西南季风水汽补给,降水更多,气候也相对湿润,而位于东南坡的 BWGJ 和 BWKG 样地靠近雅砻江,受干旱河

谷气候的影响,生境相对干旱,温度升高容易加剧土壤水分胁迫,从而抑制树木生长。BWGJ 高山松与生长季最低温度呈显著负相关(图 5a),这可能是由于生长季高温导致土壤水分蒸发加剧以及树木蒸腾作用加强、气孔关闭、光合作用减弱,从而形成窄轮,甚至影响下一年树木生长^[27-28]。类似的现象在中国西南地区也较为普遍,如在对滇西北石卡雪山和哈巴雪山高山松林的研究中发现,夏季高温是限制高山松生长的主要原因^[18-19]。BWKG 高山松径向生长主要受到生长季初期温度的限制(图 5c),研究区内生长季初期降水较少,生长季初期快速升温可能会加剧土壤水分蒸发并加强植物蒸腾作用,进一步引起土壤水分胁迫,最终导致高山松径向生长下降,此时相对湿度增加能够减少土壤水分蒸发,提高土壤含水量,为生长季树木生理活动提供充足的水分^[29-30],这可以在一定程度上解释 BWKG 高山松径向生长与当年 5—6 月相对湿度显著正相关。此外,与 BWGJ 高山松相比,BWKG 高山松树龄较大,根系更深更发达,能够从深层土壤获取更多的水分^[31],具有较强的干旱抵抗能力,这可能是导致 BWGJ 比 BWKG 高山松具有更高温度敏感性的主要原因。

气候变暖对 MLYZ 高山松径向生长具有明显的促进作用(图 5e)。高山松喜阳,鸭咀保护区气候具有升温早、降温晚、夏季降水量大的特点,生长季较高的温度能够促进树木光合作用,同时充足的水分可以有效缓解高温引起的干旱胁迫,促进高山松生长^[29]。此外,休眠期较高的温度也有利于加速积雪融化,为生长季初期高山松生长提供充足的水分^[30]。鸭咀地区夏季降水量大,土壤水分充足,但过高的降水和相对湿度通常意味着雨天较多,光照条件下降,影响树木光合作用,从而导致高山松径向生长下降^[32]。因此,降水量差异和生长季的土壤水分胁迫可能是导致博窝地区和关机地区高山松径向生长对气候因子响应不同的主要原因。类似的在对柴达木盆地东缘青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)对气候变化响应的研究中发现,生长季高温会抑制较干旱西坡树木的生长,而促进较湿润东坡树木的生长^[33]。此外,秦岭中部油松(*Pinus tabulaeformis*)林的研究结果也表明,生长季温度升高对中部南坡较湿润地区的油松生长具有促进作用,而对北坡干旱地区的油松生长产生抑制

作用^[30]。

3.2 升温突变前后高山松径向生长对气候响应的差异

升温前后三个地点高山松径向生长与气候因子相关分析发现(图6),不同地区高山松径向生长对气候因子的响应存在不同程度的“分异现象”。BWGJ高山松在升温前与温度多呈正相关关系,但在升温后与5—6月平均温度(图6a)和平均最高温度(图6g)显著负相关,同时与PDSI由负相关转为正相关(图6m),这可能是由于5—6月该地区树木正处于快速生长阶段,需要充足的水分,快速升温会加剧土壤水分蒸发,尤其在降水较少地区,土壤水分胁迫更加严重,从而抑制BWGJ高山松径向生长^[34]。BWKG高山松距雅砻江较近,水气的补充有利于缓解升温导致的干旱胁迫,然而,生长季过多的降水会减弱植物光合作用,影响BWKG高山松径向生长^[32]。升温后,MLYZ高山松径向生长与生长季和前一年生长季末温度的敏感性增强(图6c),与生长季相对湿度显著负相关(图6r),这可能是由于鸭咀地区受到西南季风的影响,生长季充足的降水能够缓解升温导致的干旱胁迫对高山松径向生长的抑制作用。此外,鸭咀地区生长季末温度升高可能会延长树木生长季长度,从而促进该地区高山松径向生长^[35]。

以往对其他地区树木生长与气候因子关系变化的研究也发现了“响应分异现象”^[6,15,36]。例如,对云贵高原云南松(*Pinus yunnanensis*)林的研究发现,温度升高会改变云南松径向生长与标准化蒸散指数的关系^[6]。在川西马尔康地区,岷江冷杉(*Abies fargesii*)和岷江柏(*Cupressus chengiana*)受到升温后春季干旱胁迫的影响,也表现出“分异现象”^[15]。除气候变化外,竞争等非气候因子也会对树木径向生长产生影响。对白马雪山混交林的研究发现,气候变暖会加强混交林的种间竞争,改变林分结构和组成^[37]。此外,高强度竞争会导致树木更易受到干旱胁迫影响,从而导致树木生长下降^[38]。然而,本文采样区中高山松为森林的主要优势树种,几乎没有其他乔木树种。因此,种间竞争对研究区域高山松径向生长的影响可能较小。

高山松种群内个体生长-气候关系变化分析发现,升温后BWGJ、BWKG和MLYZ分别有29%、32%和45%的个体与非生长季平均温度呈正相关

(图7a),有39.2%、35.7%和37.5%的高山松与生长季平均温度呈正相关(图7b),说明升温会增加高山松对温度的敏感性。相似的结论也被其他研究证明,例如,升温后青藏高原东缘云杉(*Picea asperata*)和低纬度地区冷杉(*Abies fabri*)对春季和生长季温度呈正相关的比例增加^[9]。此外,川西高原四川红杉(*Larix mastersiana*)也表现出升温后与9—10月平均温度和最低温度呈正相关的树木比例明显增加的现象^[39]。升温后三个地点高山松与前一年9—12月降水量呈正相关的树木比例减少,呈负相关的树木比例增加,这可能是由于木里地区冬季降水呈现增加的趋势^[40],气温低,积雪层厚导致春季回暖晚,从而导致来年树木生长开始时间推迟^[41]。

3.3 气候变暖背景下高山松生长动态变化

不同地点高山松径向生长与主要气候因子滑动相关分析表明,高山松对气候因子响应关系随气候变暖发生变化。在1960—2019年间,温度呈显著上升趋势,而降水以 $-30.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率下降,说明该区域气候呈现出暖干化趋势。不同地区高山松径向生长对气候因子响应时间稳定性表现出差异,MLYZ高山松与平均温度的正相关关系(图8g)和与生长季降水的负相关关系均呈逐渐增强趋势(图8h),这可能是由于湿润的环境能够提供充足的水分,可以在一定程度上缓解升温导致的干旱胁迫,从而加速树木的生长。同时气候变暖导致的生长季延长也能够对树木径向生长产生促进作用^[42-43]。而生长于较干旱生境条件下BWGJ地区的高山松径向生长与平均温度的关系由正相关转为显著负相关(图8a)。这可能是由于气候变暖会降低干旱地区的水分有效性,加剧干旱胁迫,从而减缓树木生长。如果未来该区域继续保持暖干化趋势,BWGJ高山松生长可能会受到抑制,而MLYZ高山松径向生长可能会加速。

4 结论

本文以川西山地高山松为研究对象,采用树木年轮学方法建立了树木年表,分析了过去60 a高山松的生长动态特征,并探讨了不同气候因子对树木径向生长的影响。研究结果表明:

(1)不同地点高山松径向生长对气候因子的响

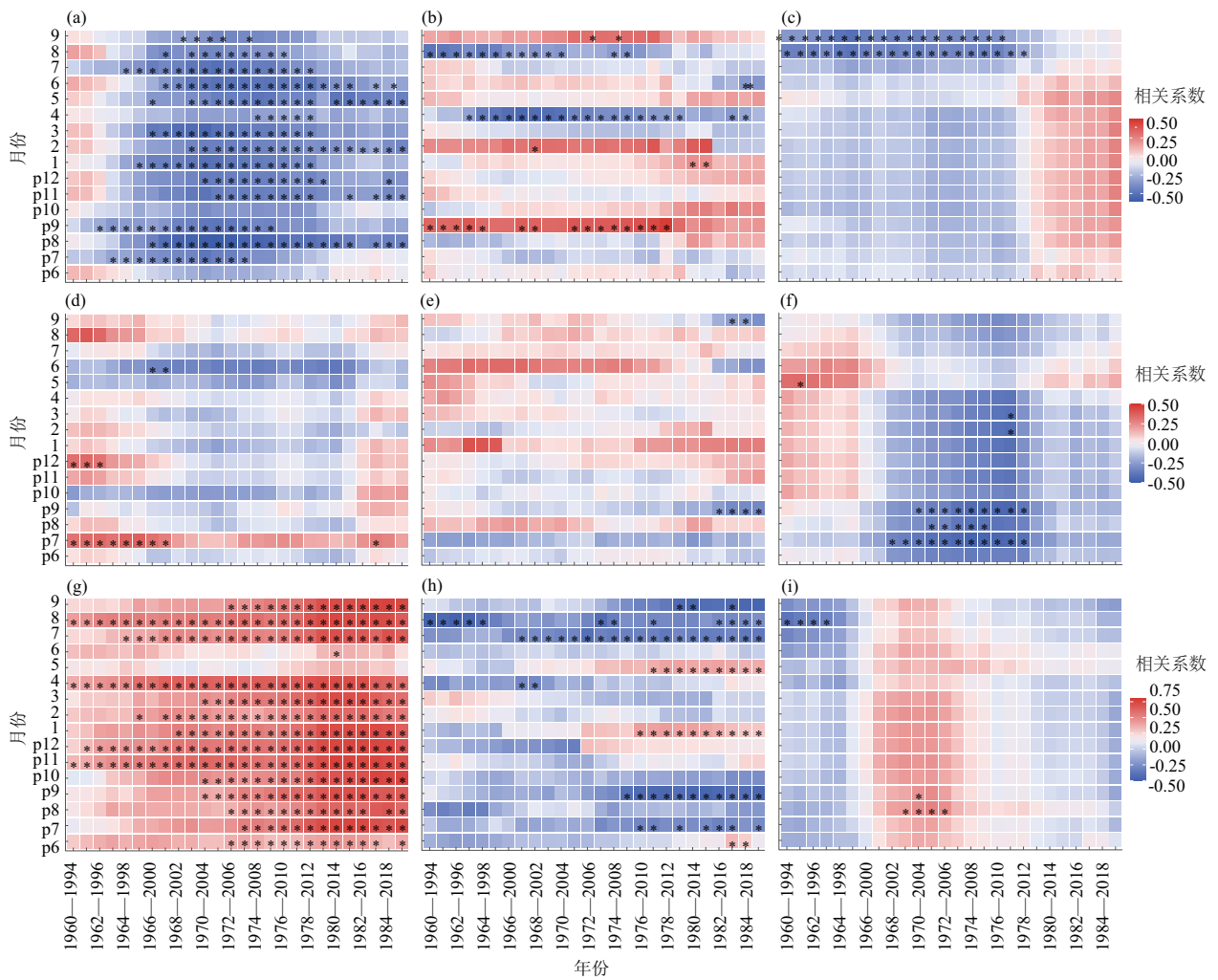


图 8 三个地点高山松 BAI 年表与平均温度、降水和帕默尔干旱指数滑动相关分析(35 a):

(a) ~ (c) BWGJ 高山松; (d) ~ (f) BWKG 高山松; (g) ~ (i) MLYZ 高山松

Fig. 8 The 35 a window moving correlations of *Pinus densata* BAI chronologies between mean temperature, precipitation and Palmer Drought Severity Index at the three sites: (a) - (c) *Pinus densata* of BWGJ;

(d) - (f) *Pinus densata* of BWKG; (g) - (i) *Pinus densata* of MLYZ

注: * 表示达到 0.05 显著性水平; p 表示上一年, 如 p6 表示上一年 6 月; (a)、(d) 和 (g) 表示高山松与平均温度的关系; (b)、(e) 和 (h) 表示高山松与降水量的关系; (c)、(f) 和 (i) 表示高山松与帕默尔干旱指数的关系。

应存在差异, BWGJ 和 BWKG 高山松径向生长主要受生长季温度控制, 而 MLYZ 高山松径向生长受到温度和生长季相对湿度的共同作用。

(2) 升温突变后, 三个地点高山松表现出不同程度的“响应分异”现象, 种群内部分个体对冬季和夏季温度响应敏感性增加, 而对冬季降水响应敏感性表现出下降趋势。

(3) 过去几十年来, 温度升高有助于促进 MLYZ 高山松径向生长, 而随着区域暖干化的持续进行, 高温和干旱胁迫对 BWGJ 高山松径向生长的抑制作用逐渐增强, 对 BWKG 高山松影响较小。因此, 在未

来气候变暖背景下, MLYZ 高山松可能会出现生长加速的趋势; 而 BWGJ 高山松受到干旱胁迫的影响, 可能出现生长下降, 甚至死亡。

参考文献 (References)

- [1] ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(4): 660-684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- [2] PONOCNÁ T, CHUMAN T, RYDVAL M, et al. Deviations of treeline Norway spruce radial growth from summer temperatures in

- East-Central Europe [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **253**–**254**: 62–70. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.02.001
- [3] SEIDL R, THOM D, KAUTZ M, et al. Forest disturbances under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(6): 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303
- [4] KEYIMU M, LI Zongshan, LIU Guohua, et al. Tree-ring based minimum temperature reconstruction on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, **251**: 106712. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106712
- [5] SILVA L C R, SUN G, ZHU-BARKER X, et al. Tree growth acceleration and expansion of alpine forests: The synergistic effect of atmospheric and edaphic change [J]. *Science Advances*, 2016, **2**(8): e1501302. DOI: 10.1126/sciadv.1501302
- [6] SHEN Jiayan, LI Zongshan, GAO Chengjie, et al. Radial growth response of *Pinus yunnanensis* to rising temperature and drought stress on the Yunnan Plateau, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, **474**: 118357. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118357
- [7] SHI Songlin, LIU Guohua, LI Zongshan, et al. Elevation-dependent growth trends of forests as affected by climate warming in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **498**: 119551. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119551
- [8] GUO Mingming, ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al. Divergent growth between spruce and fir at alpine treelines on the east edge of the Tibetan Plateau in response to recent climate warming [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **276**–**277**: 107631. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107631
- [9] 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
- [10] 刘庆, 吴彦, 何海. 中国西南亚高山针叶林的生态学问题[J]. 世界科技研究与发展, 2001, **23**(2): 63–69. [LIU Qing, WU Yan, HE Hai, et al. Ecological problems of subalpine coniferous forest in the southwest of China [J]. *WORLD SCI-TECH Research and Development*, 2001, **23**(2): 63–69] DOI: 10.16507/j.issn.1006–6055.2001.02.024
- [11] ZHANG Yuandong, GUO Mingming, WANG Xiaochun, et al. Divergent tree growth response to recent climate warming of *Abies faxoniana* at alpine treelines in east edge of Tibetan Plateau [J]. *Ecological Research*, 2017, **33**(2): 303–311. DOI: 10.1007/s11284–017–1538–0
- [12] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的稳定性评估[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(9): 1045–1057. [LI Zongshan, LIU Guohua, FU Bojie, et al. Evaluation of temporal stability in tree growth-climate response in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(9): 1045–1057] DOI: 10.3773/j.issn.1005–264x.2010.09.005
- [13] GUO Mingming, ZHANG Yuandong, WANG Xiaochun, et al. The responses of dominant tree species to climate warming at the treeline on the eastern edge of the Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, **425**: 21–26. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.05.021
- [14] 徐宁, 王晓春, 张远东, 等. 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[J]. 生态学报, 2013, **33**(12): 3742–3751. [XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al. Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(12): 3742–3751] DOI: 10.5846/stxb201211131594
- [15] 郭明明, 张远东, 王晓春, 等. 升温突变对川西马尔康树木生长的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(22): 7464–7474. [GUO Mingming, ZHANG Yuandong, WANG Xiaochun, et al. Effects of abrupt warming on main conifer tree rings in Markang, Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7464–7474] DOI: 10.5846/stxb201404140715
- [16] 杜燕, 包维楷. 高山松林生态系统研究进展[J]. 四川林业科技, 2022, **43**(5): 1–10. [DU Yan, BAO Weikai, et al. Research progress on *Pinus densata* forest [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2022, **43**(5): 1–10] DOI: 10.12172/202208220004
- [17] 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 Lili, SHAO Xuemei, et al. Reconstruction of summer temperature from maximum latewood density of *Pinus densata* in west Sichuan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(6): 998–1006] DOI: 10.11821/xb200506013
- [18] 张贇, 尹定财, 孙梅, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2442–2449. [ZHANG Yun, YIN Dingcai, SUN Mei, et al. Radial growth response of two conifers to temperature and precipitation at upper forest limits in Shika Snow Mountain, northwestern Yunnan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2442–2449] DOI: 10.5846/stxb201703260521
- [19] 王荷, 周军, 覃鑫浩, 等. 哈巴雪山高山松径向生长对气候变化的响应[J]. 林业资源管理, 2019(2): 67–72. [WANG He, ZHOU Jun, QIN Xinhao, et al. Radial growth responses of *Pinus densata* to climate change in Haba Snow Mountain, southwest China [J]. *Forest Resources Management*, 2019(2): 67–72] DOI: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2019.02.010
- [20] BUNN A G. A dendrochronology program library in R (dplR) [J]. *Dendrochronologia*, 2008, **26**(2): 115–124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
- [21] BIONDI F, QEADAN F. A theory-driven approach to tree-ring

- standardization; Defining the biological trend from expected basal area increment [J]. *Tree-Ring Research*, 2008, **64**(2): 81–96. DOI: 10.3959/2008–6.1
- [22] 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. DOI: 10.1111/gcb.12826
- [23] JUMP A S, HUNT J M, PEÑUELAS J. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica* [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(11): 2163–2174. DOI: 10.1111/j.1365–2486.2006.01250.x
- [24] FAN Zexin, BRÄUNING A, CAO Kunfang, et al. Growth-climate responses of high-elevation conifers in the central Hengduan Mountains, southwestern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(3): 306–313. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.04.017
- [25] ZANG C, BIONDI F. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships [J]. *Ecography*, 2015, **38**(4): 431–436. DOI: 10.1111/ecog.01335
- [26] 杨晨, 董晓华, 董立俊, 等. 雅鲁江流域 1961—2018 年极端气候时空演变研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(2): 46–56 + 65. [YANG Chen, DONG Xiaohua, DONG Lijun, et al. Study on the temporal and spatial evolution of extreme climate in the Yalong River basin from 1961 to 2018 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(2): 46–56 + 65] DOI: 10.12396/znsd.220706
- [27] 王婷, 于丹, 李江风, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(1): 23–33. [WANG Ting, YU Dan, LI Jiangfeng, et al. Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, **27**(1): 23–33] DOI: 10.17521/cjpe.2003.0004
- [28] 陈力, 吴绍洪, 戴尔阜. 长白山红松和落叶松树轮宽度年表特征[J]. *地理研究*, 2011, **30**(6): 1147–1155. [CHEN Li, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Analysis of the tree-ring width chronologies of *Pinus koraiensis* and *Laix olgensis* on Changbai Mountains, northeast China [J]. *Geographical Research*, 2011, **30**(6): 1147–1155] DOI: 10.11821/yj2011060018
- [29] 张艳静, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山西部雪岭云杉径向生长对气候变暖的响应差异[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(8): 2149–2159. [ZHANG Yanjing, YU Ruide, ZHENG Hongwei, et al. Difference in response of radial growth of *Picea schrenkiana* to climate warming in the eastern and western Tianshan Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(8): 2149–2159] DOI: 10.13292/j.1000–4890.201708.021
- [30] 杨镒如, 张茗珊, 张凌楠, 等. 秦岭中西部油松径向生长对气候因子的响应差异研究[J]. *生态学报*, 2022, **42**(4): 1474–1486. [YANG Yiru, ZHANG Mingshan, ZHANG Lingnan, et al. Different responses of radial growth of *Pinus tabulaeformis* to climate in the middle and western Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(4): 1474–1486] DOI: 10.5846/stxb202102060392
- [31] 秦进, 白红英, 赵培, 等. 秦岭不同龄组巴山冷杉径向生长对气候因子的响应差异[J]. *生态学报*, 2022, **42**(17): 7167–7176. [QIN Jin, BAI Hongying, ZHAO Pei, et al. Age-dependent response of *Abies fargesii* tree radial growth to climatic factors in the Qinling Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(17): 7167–7176] DOI: 10.5846/stxb202110182929
- [32] 管增艳, 金亚宁, 许倩, 等. 川西云杉人工林径向生长对气候变化的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, **27**(3): 560–567. [GUAN Zengyan, JIN Yaning, XU Qian, et al. Growth response of an artificial plantation of *Picea likiangensis* var. *rubescens* to climate change [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, **27**(3): 560–567] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2021.02040
- [33] LIANG Eyyuan, SHAO Xuemei, ECKSTEIN D, et al. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **236**(2–3): 268–277. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.09.016
- [34] 苟晓霞, 张同文, 袁玉江, 等. 阿尔泰山主要针叶树种树木径向生长及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(10): 3594–3608. [GOU Xiaoxia, ZHANG Tongwen, YUAN Yujiang, et al. Radial growth of dominant coniferous species and their responses to climate changes in the Altay Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(10): 3594–3608] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202110.041
- [35] GAO Shan, LIANG Eryuan, LIU Ruishun, et al. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas [J]. *Nature Ecology and Evolution*, 2022, **6**(4): 397–404. DOI: 10.1038/s41559–022–01668–4
- [36] 贾龙玉, 管增艳, 常瑞英, 等. 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, et al. Response of radial growth of *Rhododendron faberi* subsp. *Prattii* to climate change above treeline in the Gongga Mountain, China [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(5): 646–657] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000627
- [37] DU Qiqi, ROSSI S, LU Xiaoming, et al. Negative growth responses to temperature of sympatric species converge under warming conditions on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Trees*, 2020, **34**(2): 395–404. DOI: 10.1007/s00468–019–01924–4
- [38] 阎弘, 孙滢洁, 刘滨辉. 竞争对红松树木的干旱适应性及生长衰退影响[J]. *北京林业大学学报*, 2022, **44**(6): 1–9. [YAN Hong, SUN Yingjie, LIU Binhui, et al. Effects of competition on drought adaptability and growth decline of *Pinus koraiensis* trees [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022,

- 44(6): 1–9] DOI: 10.12171/j.1000–1522.20210198
- [39] 庞鑫, 张萌, 石松林, 等. 近65年来四川红杉径向生长对气候变暖的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 568–576. [PANG Xin, ZHANG Meng, SHI Songlin, et al. Radial growth response of *Larix mastersiana* to climate warming in the last 60 years [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(3): 568–576] DOI: 10.19675/j.cnki.1006–687x.2021.02013
- [40] 丁文荣. 横断山区干旱河谷气候变化趋势研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(6): 681–687. [DING Wenrong. Trend of the climate changes in dry valleys of Hengduan Mountains, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(6): 681–687] DOI: 10.3969/j.issn.1673–4831.2013.06.001
- [41] 王亚军, 勾晓华, 刘普幸, 等. 甘肃榆中200年来春季气温的变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 283–285. [WANG Yajun, GOU Xiaohua, LIU Puxing, et al. Change of spring temperature in Yuzhong of Gansu province during recent 200 years [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 283–285] DOI: 10.3321/j.issn:1000–694X.2006.02.023
- [42] MACIAS M, ANDREU L, BOSCH O, et al. Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* mill.) water stress in its southwestern distribution limit [J]. Climatic Change, 2006, 79(3–4): 289–313. DOI: 10.1007/s10584–006–9071–0
- [43] SONG Wenqi, MU Changcheng, ZHANG Yuandong, et al. Moisture-driven changes in the sensitivity of the radial growth of *Picea crassifolia* to temperature, northeastern Tibetan Plateau [J]. Dendrochronologia, 2020, 64: 125761. DOI: 10.1016/j.dendro.2020.125761

Spatio-Temporal Variability of Radial Growth of *Pinus densata* in Responses to Climate Change in Southwestern Sichuan, China

SHI Fengming^a, YANG Rui^a, SHI Songlin^{a, b*}, JIN Yaning^a, GUAN Zengyan^a

(*a.* College of Tourism and Urban-Rural Planning; *b.* Research Center of National Park, Sichuan

Key Research Base for Social Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The growth of subalpine coniferous forests in mountainous areas of southwestern Sichuan of China is subject to global climate change on different spatial and temporal scales. As an endemic tree species in the alpine region, *Pinus densata* is a dominant or edicator of subalpine coniferous forests in the mountains of southwestern Sichuan. Unfortunately, there was a lack of in-depth knowledge of spatiotemporal differentiation of radial growth of *Pinus densata* in response to climate change, which is not conducive to a comprehensive understanding of the response mechanism of subalpine forests to climate change in southwestern Sichuan.

In this study, it aimed alpine pines at three distinct habitat sites in Mulicounty, Sichuan province to explore the responses of tree radial growths of *Pinusdensata* to climatic factors. Three habitats for case study were selected separately at Yazui Nature Reserve, Kenggu village and Guanji village in Bowo Township, where it went through gradual changes from humid to relatively arid. Tree-ring width, tree-ring width index, and basal area increment of *Pinusdensata* were measured and calculated in terms of dendroecology method. Correlation and moving correlation analysis were used to study the relationship between climatic factors and radial growth of *Pinusdensata* at different locations.

It had following findings. (1) The radial growth of *Pinus densata* in response to climate changes exhibited remarkable differentiation at distinct habitat sites. At the Yazui Natural Reserve, the radial growth of *Pinus densata* was significantly related to the temperature and relative humidity of the previous and current growing season. At the Guanji site, tree growth was primarily limited by average minimum temperature from July to August. At the Kenggu site, the radial growth of *Pinus densata* was predominantly constrained by the average temperature and relative

humidity between May and June of the current year. (2) Temporal stability of the relationship between radial growth of *Pinus densata* and climatic factors varied among different study sites. The positive correlation between the radial growth of *Pinus densata* and temperature showed an increasing trend at the Yazui Natural Reserve. At the Guanji site, the correlation between radial growth and temperature was negative, whereas the correlation with the Palmer Drought Severity Index became positive. In contrast, the sensitivity of the radial growth in response to temperature decreased at the Kenggu site. (3) With sharp rise in temperature since 1990, there were intensive variations in the effects of increasing temperature in growing season on radial growth of *Pinus densata* at different study sites. Temperature rise promoted the growth of trees at the Yazui Natural Reserve, but inhibited them at the Guanji site; however, the growth of *Pinus densata* at the Kenggu site was narrowly influenced by temperature rise. The radial growth of *Pinus densata* in arid habitat was possible to decline affected by climate warming and *Pinus densata* in humid environment will exhibit accelerated growth, which would potentially change the forest dynamics under climate change. This study provides a scientific basis for the prediction of the growth dynamics of *Pinus densata* and the adaptive management of regional forests under the background of future climate change.

Key words: radial growth; tree ring; climate change; *Pinus densata*; Muli county, Sichuan

(责任编辑 李嵘)