

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.006

论文标题： 岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对气候的响应差异

作　　者： 刘星麟，陈治霖，陈友平，等

收稿日期： 2025-07-14

引文格式： 刘星麟,陈治霖,陈友平,等.岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对气候的响应差异[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):58-69.

Liu X L, Chen Z L, Chen Y P, et al. Differences in radial growth responses of *Abies fargesii* var. *faxoniana* to climate in different slopes of the mid-Min mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):58-69.

相关论文推荐

Recommended articles

不同径级臭冷杉的径向生长动态及其对气候因子的响应

Radial growth dynamics of different diameter classes of *Abies nephrolepis* and its response to climate factors

峨眉山不同海拔冷杉径向生长对气候变化的响应

Radial growth of *Abies fabri* response to climate change along an altitudinal transect in the Mount Emei

云冷杉针叶混交林主要针叶树种早晚材径向生长对多因子的响应

Response of early and late wood growth of main coniferous species to multiple factors in spruce fir coniferous mixed forest

长白山沿海拔梯度臭冷杉径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of *Abies nephrolepis* to climate change along an elevational gradient in Changbai mountain

亚热带杉木人工林单木径向生长对气候变化的响应

Response of individual tree radial growth to climate change in subtropical *Cunninghamia lanceolata* plantation

长白山地区臭冷杉径向生长与环境因子的响应

Response of radial growth of *Abies nephrolepis* to environmental factors in Changbai mountain

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.006 http: //qks.csuft.edu.cn

岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对气候的响应差异

刘星麟[1a]，陈治霖[2]，陈友平[3]，胡文斌[1a]，徐荣林[2]，钟益华[1b]，唐　亚[1a，1c]

（1. 四川大学 a. 建筑与环境学院；b. 灾后重建与管理学院；c. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065；2. 黄龙国家级风景名胜区管理局，四川 阿坝藏族羌族自治州 623300；3. 云南大学 生态与环境学院，云南 昆明 650500）

摘　要：【目的】揭示气候变化背景下岷山中段不同坡向岷江冷杉 *Abies fargesii* var. *faxoniana* 径向生长对主要气候因子的响应差异及其稳定性，为认识亚高山针叶林生长对气候变化的适应机制及其保护管理提供科学依据。【方法】基于 48 根采自岷山中段东坡和西坡的岷江冷杉树木年轮样芯，利用 R 语言中 dplR 扩展包建立树木年轮年表并去除生长趋势，用 Spearman 回归分析方法和 21 a 滑动相关分析方法研究 1951—2022 年岷江冷杉对月均降水、月均气温、月均高温和月均低温的响应性与稳定性以及动态变化。【结果】东坡和西坡的岷江冷杉标准年表统计特征值有差异，其中西坡岷江冷杉对主要气候因子响应的敏感性更高。两者与主要气候因子的响应关系、响应时段及稳定性不一致：东坡岷江冷杉与上年 5 月降水量的相关关系在 21 世纪后达到显著水平，与当年 9 月降水量的显著负相关关系在 1975 年后逐渐减弱；而西坡岷江冷杉与当年 6 月和 9 月降水量的相关性整体不稳定，且与上年 8 月降水量呈显著正相关。东坡与西坡岷江冷杉径向生长均受上年 7—8 月气温限制作用和当年休眠期气温的促进作用，而西坡岷江冷杉对气温的响应敏感性更高。此外，西坡岷江冷杉与上年 7 月平均气温的显著负相关关系呈减弱趋势，而东坡岷江冷杉与上年 7 月平均气温的负相关关系则随着时间变化表现出不稳定性。【结论】岷山中段东坡和西坡岷江冷杉对降水量、气温的响应特征均不一致，且响应关系在不同时间尺度上表现出明显的非稳定性和动态变化特征，表明坡向差异是影响岷江冷杉径向生长气候响应的重要因素。

关键词：岷江冷杉；径向生长；气候响应；差异

中图分类号：S718.51^{+}2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0058-12

Differences in radial growth responses of *Abies fargesii* var. *faxoniana* to climate in different slopes of the mid-Min mountains

Liu Xinglin[1a], Chen Zhilin[2], Chen Youping[3], Hu Wenbin[1a], Xu Ronglin[2], Zhong Yihua[1b], Tang Ya[1a, 1c]

(1. a. College of Architecture and Environment; b. Institute for Disaster Management and Reconstruction; c. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. Huanglong National Scenic Area Administration, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 623300, Sichuan, China; 3. School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract:【Objective】To understand how radial growth of *Abies fargesii* var. *faxoniana* on different slopes in the mid-Min mountains responds to major climatic factors, how stable these responses are under climate change, and to provide a scientific foundation for elucidating the adaptive mechanisms of subalpine coniferous forests in response to climate change, thereby informing their conservation and management strategies.【Method】Using 48 tree-ring cores collected from the east and west slopes of the mid-Min mountains and using the dplR package in R, tree-ring chronologies were developed and growth trends were removed. Spearman correlation analysis and 21-year moving correlation analysis were applied to examine the responsiveness and stability of *A. fargesii* to monthly precipitation, mean temperature, mean maximum temperature, and mean minimum temperature from 1951 to 2022.【Result】Significant differences in the statistical characteristics of the standard chronologies between the eastern and western slopes were present. *A. fargesii* on the

收稿日期（Received）：2025-07-14　　修订日期（Revised）：2025-09-15

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFE0121900）；黄龙国家级风景名胜区管理局项目（N5132112023000460）。

第一作者：刘星麟（lxl006x0@163.com），硕士研究生。

通信作者：钟益华（yihua_zhong@scu.edu.cn），助理研究员，博士；唐亚（tangya@scu.edu.cn），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：刘星麟 , 陈治霖 , 陈友平 , 等 . 岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对气候的响应差异 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(7):58-69.

Liu X L, Chen Z L, Chen Y P, et al. Differences in radial growth responses of *Abies fargesii* var. *faxoniana* to climate in different slopes of the mid-Min mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):58-69.

east slope exhibited higher sensitivity to the key climatic factors, with divergent response relationships, response stability and temporal patterns compared to that on the west slope. The negative correlation between the eastern-slope *A. fargesii* chronology and previous May precipitation became significant after the beginning of the 21st century, whereas the significantly negative correlation with current September precipitation gradually weakened after 1975. Meanwhile, trees on the west slope displayed unstable correlations with current June and September precipitation, but maintained a significant and stable positive association with previous August precipitation. Radial growth on both slopes was limited by July-August air temperatures of the previous year but promoted by air temperatures during the dormant period and growing season of the current year, with trees on the western slope more sensitive to air temperature. Trees on the west slope exhibited a gradual weakening of the previously significant negative response to the previous July mean temperature, while those on the east slope showed temporal instability in the same correlation.【Conclusion】The response patterns of *A. fargesii* on the eastern and western slopes of the central Minshan mountains to precipitation and air temperature were inconsistent, and the response relationships exhibited marked non-stationarity and dynamic variability across different time scales, indicating that slope aspect is an important factor influencing the climatic response of radial growth in *A. fargesii*.

Keywords: *Abies fargesii* var. *faxoniana*; radial growth; climatic response; divergence

树木年轮是研究气候变化重要的替代信息来源 [1]。由于树木生长对环境变化高度敏感，树木年轮气候学已成为探究区域气候与环境演变的重要手段 [2]。依托该方法，可反演历史气候状况，重建百年至千年尺度的温度与降水序列，明晰气候及环境的演变规律。

政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出，工业革命以来全球地表平均气温升高约 1.1 ℃。气候变暖会改变树木径向生长的起始、持续与终止时间，致使树木对气候变暖的响应趋于复杂，径向生长与气候因子的关联关系发生改变，尤其在中高纬度、高海拔等气候敏感区域，树木径向生长呈现显著不稳定性与空间差异性，并存在明显的响应分异特征 [3-4]。山体可通过调控太阳辐射分配，造成不同坡向光照、气温及土壤湿度存在显著局地差异；因此，同一区域内生长于不同坡向的树木，对区域气候的响应特征存在分化。Zhang 等 [5] 指出气候变暖是导致树线上升的关键因素，抑制了祁连山东部圆柏 *Juniperus chinensis* 的正常生长；华亚伟 [6] 发现，秦岭中部南坡木王国家森林公园和北坡南五台油松 *Pinus tabuliformis* 的径向生长对两地气候的响应存在一定差异，而且随着气候变化的持续，南坡和北坡树木径向生长对气候响应的敏感性也呈现出不同程度的变化；秦进等 [7] 对太白山地区南北坡太白红杉 *Larix chinensis* 的研究表明，不同坡向树轮宽度指数对气候因子敏感性不同；王东等 [8] 对川西亚高山林线交错带岷江冷杉 *Abies fargesii* var. *faxoniana* 生长特征的研究发现，不同坡向的岷江冷杉生长速率不同；李岱韩 [9] 针对青藏高原东部 4 个林区阴坡和阳坡树木的生长趋势的研究表明，阴坡与阳坡树木径向生长对气候响应机制不完全一致。此外，不少研究表明，不同生境的树木径向生长对气候的响应可能存在分异现象，且海拔、坡向、土壤成分和空气湿度等都可能是其影响因子之一 [10-12]。

主峰海拔 5 588 m 的岷山山脉，地处甘肃省南部和四川省北部，西北至东南走向，纵贯四川阿坝州东北部，西北毗连西倾山，南与邛崃山相接。它不仅是黄河水系的黑河与长江水系的白水河的分水岭，也是长江水系的岷江与涪江的分水岭。因其地理位置、巨大山体和海拔，岷山东西两侧受季风的影响不同。冬季主要受西向干冷气流控制，降水稀少；夏季东南季风与四川盆地水汽受地形抬升作用显著；整体形成“东南湿润、西北干冷”的水热分异格局，并常伴随焚风效应 [13]。然而，在当前气候变化背景下，针对该地区不同生境下树木径向生长对气候要素的响应及响应稳定性的研究有限 [14]，已有的不同坡向树轮径向生长差异研究多集中于南北坡向对比 [15]。本研究在前人成果基础上，结合岷山山脉中段独特地理环境及风力、水汽分布特征，选取东坡和西坡岷江冷杉年轮宽度数据，采用静态相关分析与滑动相关分析相结合的方法，系统探究树轮生长对气候因子的响应关系及二者关联的时序动态变化，揭示该区域树木气候响应的坡向分异规律；通过对比不同坡向岷江冷杉的气候响应敏感性与稳定性，补充完善岷山地区树轮气候响应时序变化相关研究，预判气候变化背景下林木生长的未来演变趋势，同时为应对区域气候变化与森林植被精细化管理提供理论依据与数据支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州东北部松潘县境内，地处青藏高原东缘构造单元与岷山山脉中段的复合地貌区；岷山山脉中段为长江

上游岷江、涪江 2 大水系的分水岭。该区气候受东南季风、西南季风与高原季风共同影响，隶属青藏高原气候区，热力格局表现为冬季严寒、夏季温凉。受坡向与水汽分配影响，东坡涪江流域气候较西坡岷江流域更为湿润；涪江流域年日照时数（989 h）与日照百分率（24%）均低于岷江流域（年日照时数 1 822 h，日照百分率 41%）[16]。采样区（32°33′ ～ 32°44′N，103°29′ ～ 103°50′E）涵盖牟尼沟与黄龙沟 2 大片区。本研究在岷山山脉中段东坡和西坡分别设立了采样点。其中，牟尼沟地处岷山山脉西麓中段，采样点方位角 85° ～ 95°，局部坡面近正东向，平均海拔 3 312 m，隶属于岷江源区；虽该点位局部坡向东，但牟尼沟整体隶属于岷山西坡流域格局，因此将采样点 1 简称西坡（编码 MSX）。黄龙沟位于岷山主峰雪宝顶西北延伸的支脉山体，毗邻玉翠峰，采样点方位角 260° ～ 280°，局部坡面近正西向，平均海拔 3 549 m，隶属于涪江源区；结合黄龙沟整体山体水系归属东坡流域格局，因此将采样点 2 简称东坡（编码 MSD）。采样点 1 与采样点 2 皆属典型中海拔向高海拔过渡的地带，尽管存在一定高差，但均位于同一山体的相近气候区间内，具备较强的可比性。松潘县森林覆盖率 52.3%，植被呈现明显的垂直地带性分布，以亚高山针叶林、山地针阔混交林和高山灌丛草甸为主，在海拔 2 600 ～ 3 500 m 有大面积的岷江冷杉林，在海拔 3 500 ～ 3 900 m 有大量鳞皮冷杉 *Abies squamata* 林。

1.2 材料采集

2023 年 11 月和 2024 年 4 月，分别在采样点 1 和采样点 2 采集群落中长势良好、胸径较大的岷江冷杉，共 138 根样芯。采样点树木受地表水及其他因素的影响小，并远离人为活动区域。采样严格参照国际树轮数据库标准，遵循生态环境选取原则与复本原则，采用内径 5.15 mm 的生长锥，在树木胸高位置，以近 90° 交叉方向钻取 1 ～ 2 份树芯样品；同时详细记录各采样点生境条件及树木胸径。采样完成后，将样品装入 PE 塑料管密封保存，带回实验室开展后续处理。

1.3 年表建立

将样芯进行自然晾干、乳胶固定后，依次使用 P400、P800 和 P1200 的砂纸逐级打磨抛光，直至样芯木质部细胞结构完整显露、年轮边界清晰可见。预处理后，依据年轮的宽窄进行初步定年；再用 Lintab 6 树轮分析仪精确测量年轮宽度（精度 0.001 mm）。结合特殊结构对应的生长年份进行比对分析，剔除生长异常、且与主序列相关性较差的不合格样芯。为保证定年的准确性，用 COFECHA 程序对测量所得的生长曲线进行交叉定年和测量结果的检验。采样点 1 缺轮率为 0.618%，采样点 2 无缺轮。剔除与主序列相关性不高（$r < 0.328$）、年轮序列极不完整和不能正常交叉定年的树芯 [17]，最终共保留样芯 48 根。为减少

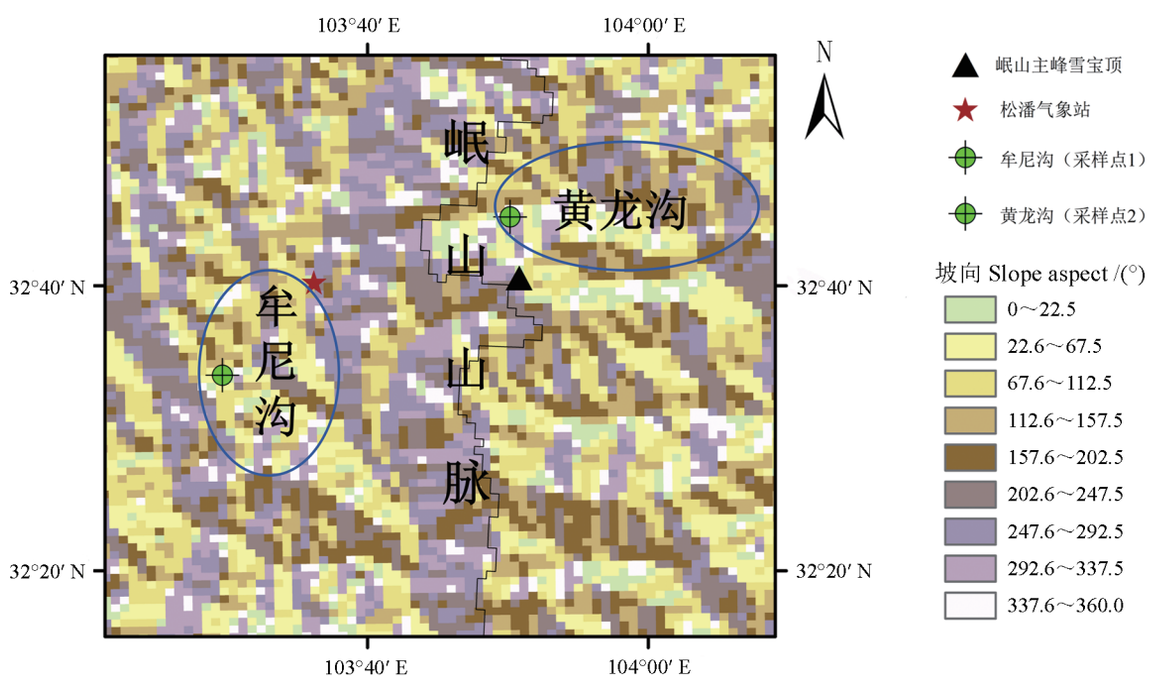


图 1 研究区概况及采样点位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

或去除由外界干扰、树木年龄增大以及树木胸径增大等因素造成的年轮宽度变化，经交叉定年后利用 R 语言中的 dplR 包建立树木年轮年表，对已定年的树轮序列采用修正负指数函数去除生长趋势和树木间相互竞争的影响 [18]。对拟合效果较差的样芯，采用步长为序列长度 67% 的样条函数拟合，经过多次迭代，直到当前迭代与上一次迭代的序列残差波动小于 0.01，最终得到标准化年表（Standard chronology，STD）和差值年表。标准化年表同时保留高频和低频气候信号，而差值年表仅保留高频信号，故本研究全部采用标准化年表进行相关分析。

1.4　气象数据

研究区的气候资料来自松潘气象站（32°40′N，103°36′E），海拔 2 881.3 m，与黄龙沟相距 20 km，与牟尼沟相距 12 km，是距离采样点最近的国家级气象站。气象数据来源于国家气象信息中心（https://data.cma.cn/）发布的中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）。利用 Python 编程完成站点日值数据进行提取、整理与统计，获得 1951—2022 年共 72 年的完整气象资料，并进一步转换为月尺度气候序列；选取月降水量、月平均气温、月平均最高气温和月平均最低气温开展后续分析。

1.5　研究方法

鉴于树木生长对气候的响应有滞后性（采样树木的生长会受前 1 年气候影响），因此选用前 1 年 5 月至当年 10 月（共 18 个月）作为分析指标 [19]。采用 SPSS 27.0 软件开展树轮 - 气候相关分析。为避免受数据偏态分布影响，采用 Spearman 秩相关分析法计算年轮指数与 1951—2022 年各气候因子相关性，并用 OriginPro 2021 软件完成制图。为评估树木径向生长对主要气象因子响应关系的时间稳定性，本研究综合考量年轮数据的时间分辨率与相关关系评估的稳健性，以确保滑动相关分析在揭示树木气候响应动态趋势时具备充足的统计可靠性与时间覆盖广度。本研究选取 21 a 作为滑动窗口长度 [20]，基于 R 语言（版本 4.4.2）平台完成滑动相关计算、动态响应分析及可视化绘图。

2　结果与分析

2.1　气候特征

如图 2 所示，研究区年平均降水量 730.0 mm，年均气温 6.0 ℃，年均最低气温 0.3 ℃，年均最高气温 14.8 ℃；气温最低的月份为 1 月（平均 −3.8 ℃）；气温最高的月份为 7 月（平均 14.6 ℃）；6—9 月是年内气温最高的时间段（平均 13.2 ℃）。

5、6、9 月的降水量较高，月均降水量分别为 113、114、110 mm；年内降水主要集中在 5—9 月，该时间段内的总降水量为 524 mm，占全年降水量的 72%；12 月的平均降水量最低，仅 4 mm；6 月的平均降水量最高，为 114 mm；虽雨热同季，但气温与降水量的峰值不同。

从长期变化趋势看（图 3），年降水量年际变化大，但没有明显的上升或下降趋势，长期变化趋势较弱，仅表现出不明显的缓慢增加趋势；年平均气温呈明显上升趋势，增温速率约为 0.016 ℃ /a，尽管年际间存在一定波动，但 20 世纪 50—80 年代年平均气温总体偏低，进入 21 世纪后明显升高，于 2006 年达到最高值 7.3 ℃。

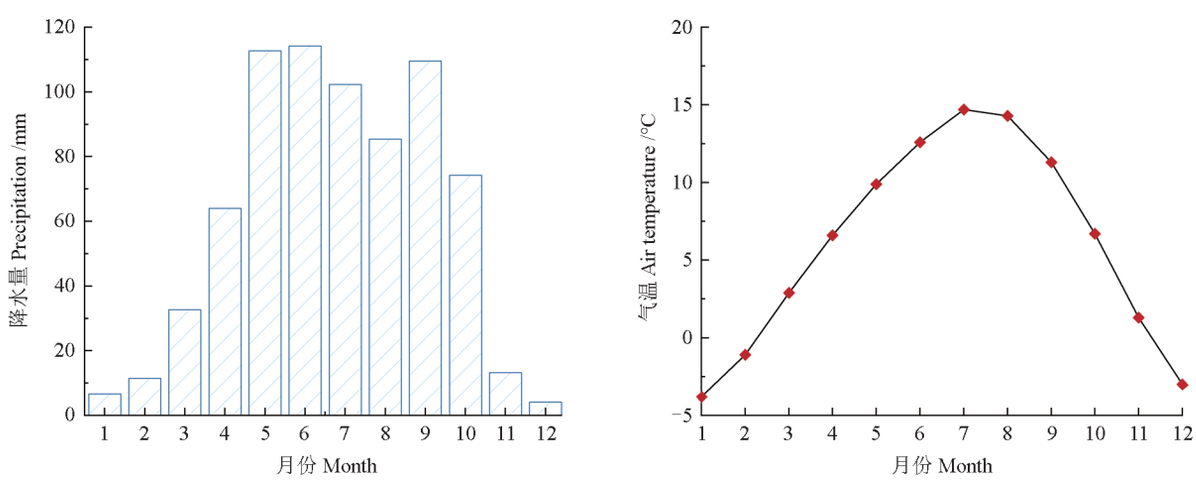


图 2　1951—2022 年逐月平均气温及降水量变化

Fig. 2　Changes of monthly mean temperature and precipitation from 1951 to 2022

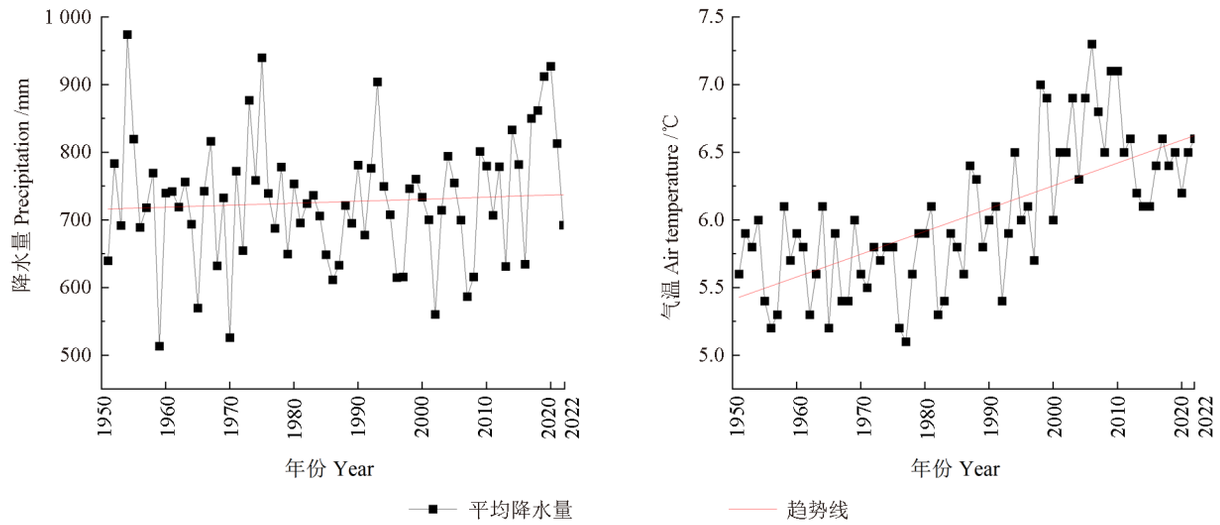


图 3 年平均气温和年降水量变化趋势

Fig. 3 Changing trend of annual mean temperature and annual precipitation

2.2 树轮年表特征

不同坡向岷江冷杉标准化年表显示（图 4），西坡和东坡树轮宽度指数序列具有不同的波动状况，说明东坡和西坡岷江冷杉的径向生长可能受到不同生境条件限制，这也得到年表统计特征值支持（表 1）。

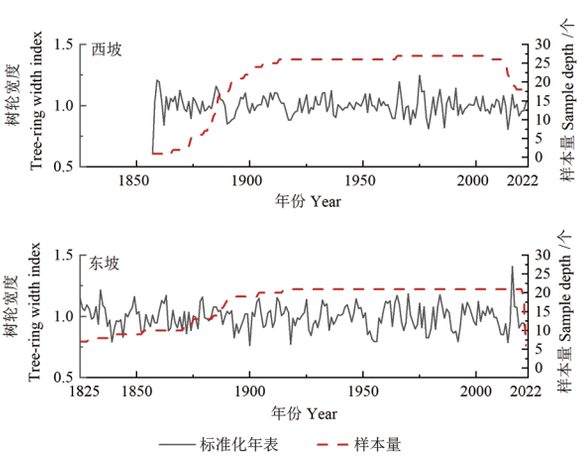


图 4 不同坡向岷江冷杉树轮宽度指数与样本量

Fig. 4 Tree-ring width STD chronologies and sample depth of *A. fargesii* var. *faxoniana* from different slope aspects

年表特征的相关统计分析能够有助于认识树木生长的基本要素与周围生长环境变化的关系，并反映其包含环境信息的多少。东坡和西坡树轮年表统计特征值存在一定差异（表 1）。MSD 和 MSX 平均敏感度分别为 0.157 和 0.173，表明 2 个采样区受气候变化的影响程度相当；标准差分别为 0.182 和 0.190，意味着东坡和西坡树轮年表所包含的气候信息都较为丰富；树木间平均相关系数分别为 0.356 和 0.196，表明 2 地树木生长均可能受气候与非气候因素共同影响；一阶自相关系数分别为 0.096 和 0.302，说明西坡岷江冷杉受上年气候影响更大；信噪比分别为 11.624 和 6.596，表明东坡岷江冷杉中气候信息含量较多；样本量总体代表性分别为 0.921 和 0.868，均超过符合理论年表特点的树木年轮分析临界阈值 0.850 [21]。

表 1 树轮年表统计特征值

Table 1 Tree-ring chronology statistical characteristic values

统计特征 Statistical characteristic	MSD	MSX
平均年龄 Average age /a	175	132
平均敏感度 Mean sensitivity	0.157	0.173
标准差 Standard deviation	0.182	0.190
树木间平均相关系数 Mean correlation	0.356	0.196
一阶自相关系数 First-order auto-correlation	0.096	0.302
信噪比 Signal-to-noise ratio	11.624	6.596
第 1 主成分方差解释量 Variance in first eigenvector /%	40	26
样本总体代表性 Expressed population signal	0.921	0.868

2.3 树木径向生长对气候因子的响应分析

整体来看，东坡和西坡的岷江冷杉对气温和降水的响应敏感性不同（图 5）。在对月降水量的响应方面，东坡树轮年表与上年 5 月至当年 10 月月降水量整体以负相关为主，而西坡树轮年表与月降水量呈正、负相关的月份数量大致相当；西坡树轮年表与当年 6 月和 9 月月降水量呈显著负相关（r_6=−0.232，P < 0.05；r_9=−0.263，P < 0.05），东坡树轮年表仅与当年 9 月月降水量呈显著负相关（r_9=−0.271，P < 0.05），与上年 5 月呈显著负相关（r_5=−249，P < 0.05）。

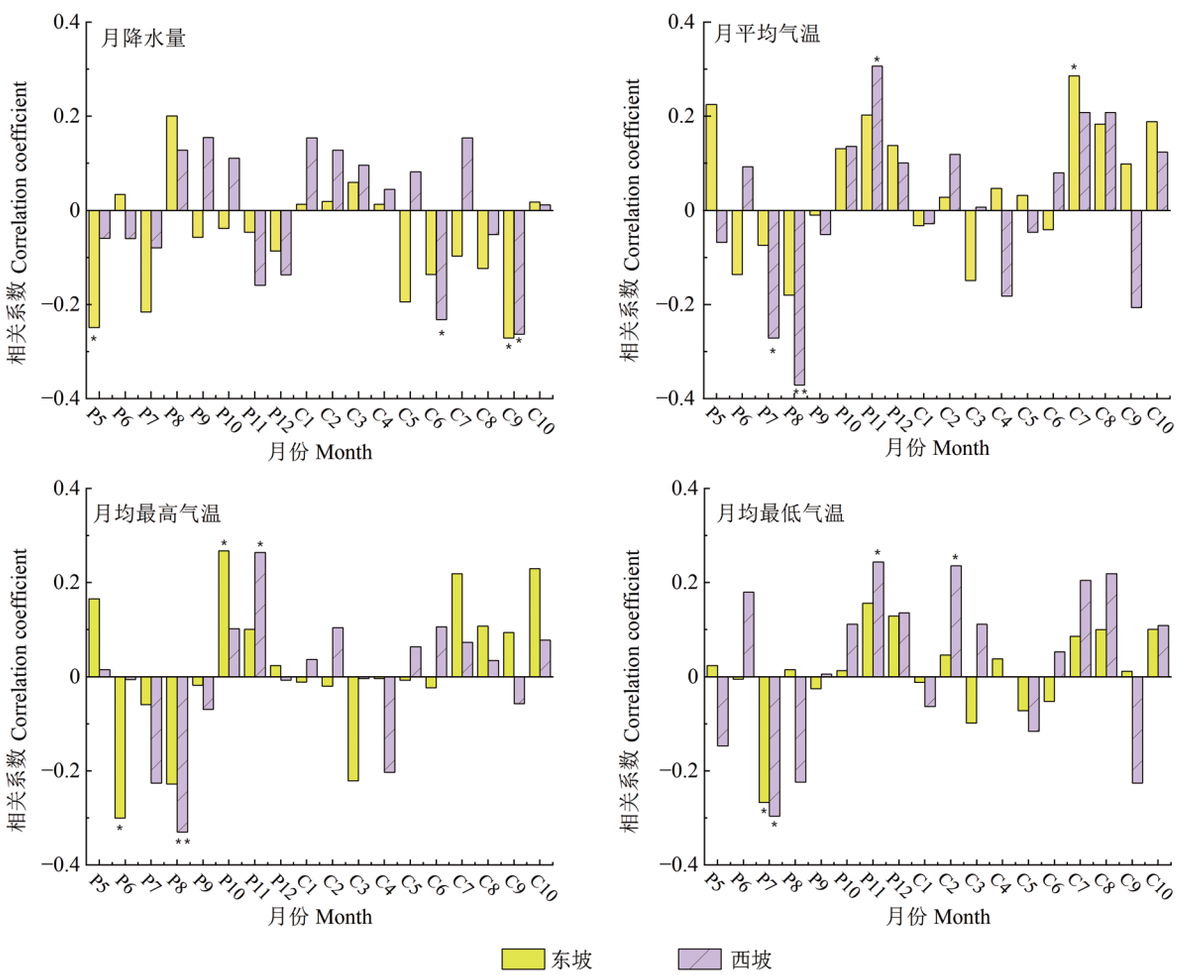
在对气温的响应方面，上年 5 月至当年 10

月期间西坡树轮年表和东坡树轮年表与月平均气温和月均最低气温均以正相关为主，而与月均最高气温以负相关为主。月平均气温方面，东坡树轮年表仅与当年 7 月平均气温呈显著正相关（r_7=0.286，P < 0.05）；西坡树轮年表与上年 7、8 月平均气温分别呈显著、极显著负相关（r_7=−0.271，P < 0.05；r_8=−0.371，P < 0.01），与上年 11 月平均气温呈显著正相关（r_{11}=0.307，P < 0.05）。月均最高气温方面，东坡树轮年表与上年 6 月平均最高气温呈显著负相关（r_6=−0.300，P < 0.05），与上年 10 月平均最高气温呈显著正相关（r_{10}=0.268，P < 0.05）；而西坡树轮年表与上年 8 月平均最高气温呈极显著负相关（r=−0.330，P < 0.01），与上年 11 月平均最高气温呈显著正相关（r_{11}=0.264，P < 0.05）。月均最低气温方面，东坡树轮年表仅与上年 7 月月均最低气温呈显著负相关（r_7=−0.267，P < 0.05）；而西坡树轮年表与上年 7 月平均最低气温呈显著负相关（r_7=−0.296，P < 0.05），与上年 11 月平均最低气温和当年 2 月平均最低气温呈显著正相关（r_{11}=0.244，P < 0.05；r_2=0.236，P < 0.05）。

2.4　树木生长与气候因子关系的时间稳定性

滑动相关分析结果显示（图 6、7），1951—2022 年时段内，东坡和西坡岷江冷杉径向生长与气温、降水量的相关系数均随时间而发生变化；部分月份相关系数出现由正转负或由负转正的转变，不同坡向树轮年表对主要气候因子的响应存在差异。

不同坡向岷江冷杉在时间上对降水量的响应稳定性不一致。东坡冷杉与上年 5 月降水量的负相关性在 21 世纪后达到显著水平（P < 0.05），与当年 9 月降水量的显著负相关性（P < 0.05）在 1975 年后逐渐减弱（图 6a）。西坡冷杉径向生长与当年 6 月、9 月降水量的相关性整体表现不稳定；其与上年 8 月降水量的相关性在 1971 年呈显著正相关（P < 0.05），1992 年转为显著负相关（P < 0.05），此后相关关系再次趋于不稳定（图 7a）。



P 表示上年，C 表示当年；“*”表示显著相关（P < 0.05），“**”表示极显著相关（P < 0.01）。下同。
P indicates previous year, and C indicates current year; “*” indicates significant correlation at P < 0.05, “**” indicates extremely significant correlation at P < 0.01. The same below.

图 5　不同坡向的年轮指数与气候因子的相关性
Fig. 5　Correlations between tree-ring indices and climate factors from different slope aspects

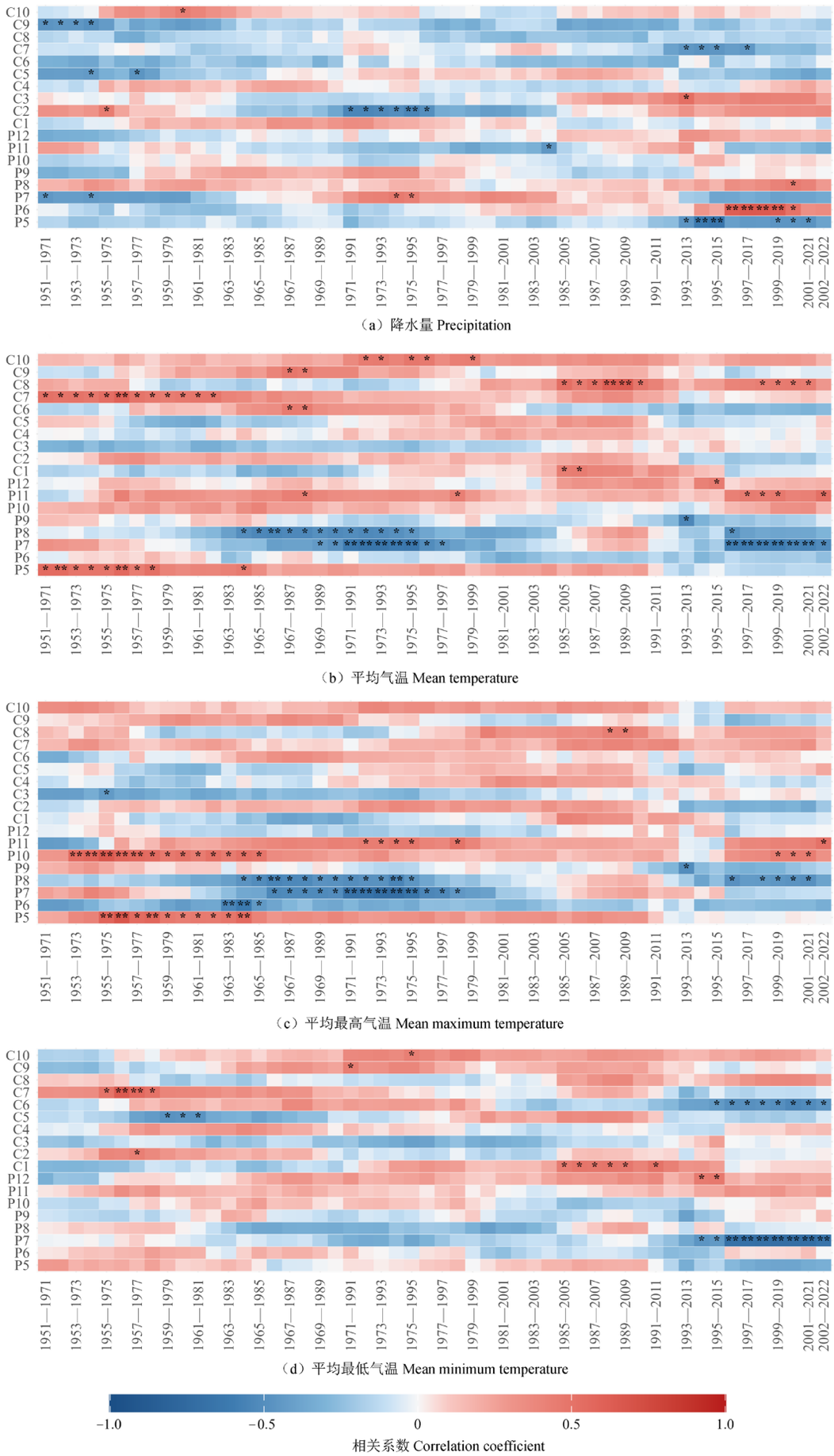


图 6 东坡树轮年表与气候因子的 21 a 滑动相关分析

Fig. 6 21-year moving correlation analysis between the east slope tree chronology and climatic factors



图 7　西坡树轮年表与气候因子的 21 a 滑动相关分析

Fig. 7　21-year moving correlation analysis between the west slope tree chronology and climatic factors

此外，对气温响应的分析结果显示，不同坡向的树轮年表对气温响应也存在差异。东坡树轮年表与上年 5 月和当年 7 月平均气温的显著正相关（$P < 0.05$）分别在 1978 年和 1982 年转为不稳定状态（图 6b），西坡树轮年表与上年 7、8 月平均气温的显著负相关（$P < 0.05$）分别在 1995 年和 2004 年后转为不稳定状态和不显著负相关（图 7b）。东坡树轮年表，与上年 5 月平均最高气温呈显著正相关（$P < 0.05$），该相关关系在 1984 年后逐渐减弱，并在 2011 年后转为不稳定状态；与上年 10 月平均最高气温呈显著正相关（$P < 0.05$），1985 年后逐渐减弱，1999—2021 年再度达到显著水平；与上年 7、8 月平均最高气温的相关性整体表现不稳定（图 6c）。西坡树轮年表，与上年 5、10 月平均最高气温相关性不稳定；与上年 8 月平均最高气温在 20 世纪末前期一直呈显著负相关（$P < 0.05$），21 世纪后相关关系转为不稳定（图 7c）。东坡树轮年表，与上年 7 月平均最低气温的负相关性在 1994 年后达到显著水平（$P < 0.05$）；与当年 2、5、7 月平均最低气温相关性整体不稳定（图 6d）。西坡树轮年表，与上年 5 月平均最低气温呈负相关，并在 1991—2011 年达到显著负相关（$P < 0.05$）；与当年 2 月平均最低气温呈显著正相关（$P < 0.05$），并且该相关关系在 1981 年后逐渐减弱；与当年 10 月平均最低气温由不显著负相关于 1979 年转为显著正相关（$P < 0.05$）（图 7d）。

3 讨 论

3.1 岷山中段不同坡向岷江冷杉对树木径向生长的响应

树木形成层活动受外部环境，特别是气候因素的显著影响，而温度和降水是树木生长的主要限制因子 [22]。根据岷山中段二道海林区和扎日寺林区不同坡向紫果云杉 *Picea purpurea* 和岷江冷杉所制的树轮年表，郭滨德等 [23] 发现，随着快速升温，不同坡向云杉、岷江冷杉径向生长与气候因子的关系存在差异。本研究中，随着时间变化，东坡冷杉与当年 9 月降水量由显著负相关转变为不显著负相关，而西坡岷江冷杉与当年 9 月降水量的负相关逐渐趋于显著，这种分异现象可能与坡向引起的生境差异和气候变化对生长季的动态调控有关 [2]。西坡日照时间和日照百分率都高于东坡 [12]，而较长的日照时间和较高的日照百分率会加大水分蒸散速率，使得植物对水分变化更为敏感；东坡日照时间短，日照百分率低，可能因气候变暖延长植物生长季，减弱秋季降水对形成层活动的抑制 [22]。另外，西坡树轮年表与当年 6 月降水量呈显著负相关，东坡与上年 5 月降水量呈显著负相关。5—9 月为本研究区域的汛期，此间较为集中的降水可能会对树木正常生长起抑制作用，这与李思其 [24] 揭示的生长季降水量过大会造成树轮宽度与降水量呈负相关或不相关的结果一致。此外，相比西坡树轮年表，东坡树轮年表对气温的响应敏感性更低，且在部分时间段响应不一致，这可能与西坡通常比东坡接收更多的太阳辐射有关。坡向是控制太阳辐射接收量的关键地形因子，通过影响热量积累、土壤水分状况和蒸散过程，改变树木对气候因子响应机制 [25]。西坡树轮年表与上年 7 月平均气温、上年 8 月平均气温、上年 7 月平均最高气温、上年 7 月平均最低气温呈显著负相关，东坡树轮年表与上年 6 月平均最高气温、上年 7 月平均最低气温呈显著负相关，表明岷山中段地区岷江冷杉对温度因子的响应存在明显滞后性。这一现象可能与碳水储备的延迟效应有关。结合夏季高温对树木光合作用、关键酶活性、叶绿素荧光参数及气孔导度的影响，进而抑制树木生长 [26]。东坡和西坡树轮年表均与当年 1—3 月平均气温呈正相关，说明在水分充足的条件下，当年气温升高会加速细胞分裂和伸长，尤其是早材的形成，导致年轮增宽 [27]。另外，11 月平均气温对岷江冷杉生长有促进作用，这与其分布于高海拔的湿冷地区，具有耐阴、耐寒，适宜温凉湿润气候的特点，因而不易受低温胁迫有关 [28]。西坡树轮年表与当年 2 月平均最低气温呈显著正相关，反映当年气温达到适合该地区岷江冷杉生长阈值时，不断促进树木光合作用的进行 [29]。2 月为树木生长初期，该时段适宜气温（−5 ℃以上）不仅能减少极端冻害风险，保护芽和形成层免受损害，还能提升树木体内与生长相关的酶活性，从而促进营养物质的有效运输。东坡树轮年表与上年 10 月平均最高气温呈显著正相关，西坡树轮年表与上年 11 月平均最低气温、平均气温和平均最高气温呈显著正相关。此时段岷江冷杉进入生长季末期，气温降低到一个较为适宜的区间，有利于树木正常生长和发育。在高原地区的高海拔地带，由于气候较为寒冷，这里的树木反而更加适应这种寒冷的温度条件 [30]。

3.2 岷江冷杉与气候变化分异现象的可能原因

树木生长对不同气候因子的响应有差异 [31]。

影响树木径向生长对气候响应差异性的因子包括海拔、温度、降水量、坡向和土壤湿度等。土壤瘠薄、气候严寒、强风等会导致树木生长速率下降而限制树木的正常生长 [32-33]。海拔与坡向的变化会导致局地水热条件的重新分布，而水热状况的差异是驱动树木径向生长是否发生分异的关键气候因子 [34]。有研究认为，低海拔树木的径向生长主要受夏季降水量的影响，而高海拔树木的径向生长则主要受生长季节温度的控制。相比之下，中海拔树木的径向生长与气候因素之间的关系并不明显 [35-36]；但也有研究发现，寒冷地区树木的径向生长主要受降水量的影响，而温暖地区树木的径向生长多受温度的影响 [37]。刘欣 [38] 的研究表明，在大兴安岭中部，南坡与北坡的兴安落叶松 *Larix gmelinii* 径向生长存在差异性，而在该山脉南部地区，不同坡向的兴安落叶松则表现出相似的径向生长特征。究其原因，气温对树木年轮宽度的影响受多重因子共同调控，与树木所处的生长阶段、地理位置以及环境条件都紧密相关 [39]。同时，国内外学者研究发现 [40]，不同树种在不同龄级的气候敏感性以及树轮 - 气候响应关系也存在差异。总的来看，坡向引起的气候因素的变化对树木的影响研究还十分有限，需要更多研究才能获得具有普遍规律的认识。本研究在采样时仅选取区域内中高海拔优势树种开展分析，后续可进一步拓宽海拔梯度与植被类型，并结合多环境驱动因子开展耦合研究，深入揭示不同生境下植物种群的气候适应机理。

4　结　论

1）基于标准年表的统计特征值分析，东坡和西坡岷江冷杉树轮年表平均敏感度、信噪比、标准差和样本总体代表性等特征参数都处于较高水平，均表明其能够有效反映区域气候变化。此外，东坡和西坡树轮年表存在一定差异，西坡对气候的敏感性略高于东坡。

2）不同坡向岷江冷杉对气候响应的敏感性不同。东坡和西坡岷江冷杉同受当年汛期降水限制和上年夏季温度限制，上年休眠期对其生长主要起促进作用。西坡岷江冷杉的径向生长对气温的敏感性高于东坡。

3）东坡冷杉和西坡冷杉对气温、降水量的响应特征和响应稳定性不一致。例如，东坡岷江冷杉与当年 9 月降水量的负相关关系自 1975 年后随时间逐渐减弱，而当年 9 月降水量对西坡岷江冷杉的限制作用随时间变化表现不稳定，直至 1996 年后才达到显著负相关水平。在温度响应方面，东坡岷江冷杉与上年 7 月平均气温的负相关关系随时间变化呈现不稳定性；而西坡岷江冷杉与上年 7 月平均气温在 1955—1995 年呈显著负相关，此后该相关关系逐渐减弱。在当前气候变暖的大背景下，随着温度升高，东坡与西坡冷杉对气温响应的时间稳定性愈发明显。

本研究明确揭示了岷山中段不同坡向岷江冷杉径向生长对主要气候因子的响应规律及其稳定性差异，为岷山地区亚高山针叶林生态系统的保护、恢复与经营管理提供了理论依据与数据支撑。在气候变化背景下，后续可因地制宜制定分区管控策略，优化林分结构与树种配置，进一步提升森林生态系统的稳定性。

参考文献：

[1] 徐姗姗 , 张子信 , 赵志军 , 等 . 青藏高原树轮气候学研究进展综述 [J]. 冰川冻土 ,2025,47(2):522-536.
Xu S S, Zhang Z X, Zhao Z J, et al. Review of dendroclimatological research on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2025,47(2):522-536.

[2] 王兆鹏 , 张冬有 , 张同文 , 等 . 大兴安岭北部不同海拔樟子松树轮宽度对气候因子的响应 [J]. 生态学报 ,2024,44(17):7646-7661.
Wang Z P, Zhang D Y, Zhang T W, et al. Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* tree ring width to climate factors at different elevations in the northern Greater Khingan mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(17):7646-7661.

[3] 于德水 , 卢杰 , 张萌 , 等 . 西藏色季拉山西藏红杉径向生长对气温和降水波动的响应 [J]. 林业科学研究 ,2023,36(1):91-99.
Yu D S, Lu J, Zhang M, et al. Response of radial growth of *Larix griffithii* to temperature and precipitation fluctuation in Xizang shergyla mountain[J]. Forest Research,2023,36(1):91-99.

[4] 王琦 , 王子逍 , 刘太艳 , 等 . 长白山地区臭冷杉径向生长与环境因子的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(11):55-65.
Wang Q, Wang Z X, Liu T Y, et al. Response of radial growth of *Abies nephrolepis* to environmental factors in Changbai mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(11):55-65.

[5] Zhang F, Chen Q M, Gou X H, et al. Climatic control on the growth and regeneration of *Juniperus przewalskii* at alpine treeline in the eastern Qilian mountains, northwest China[J]. Trees-Structure and Function,2021,35:1085-1097.

[6] 华亚伟 . 基于树木年轮的秦岭中部南北坡油松对气候的响应与区域气候重建 [D]. 西安 : 西北大学 ,2020:59-60.

Hua Y W. The tree-ring based study on response of *Pinus tabuliformis* on the south and north slope of the central Qinling mountains to climate and regional climate reconstruction[D]. Xi'an: Northwest University,2020:59-60.

[7] 秦进 , 白红英 , 李书恒 , 等 . 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异 [J]. 生态学报 ,2016,36(17):5333-5342.
Qin J, Bai H Y, Li S H, et al. Differences in growth response of *Larix chinensis* to climate change at the upper timberline of southern and northern slopes of Mt. Taibai in central Qinling mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(17):5333-5342.

[8] 王东 , 薛盼盼 , 李裙溢 , 等 . 川西亚高山林线不同坡向岷江冷杉生长特征研究 [J]. 陆地生态系统与保护学报 ,2022,2(2):92-99.
Wang D, Xue P P, Li J Y, et al. A study on the growth characteristics of *Abies fargesii* var. *faxoniana* on different slope aspects in the timberline ecotones in the subalpine area of western Sichuan, China[J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2022,2(2):92-99.

[9] 李岱韩 . 青藏高原东部阴坡和阳坡树线林木生长对气候变化的响应差异者 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2024:60-61.
Li D H. Different responses of forest tree growth at treelines to climate change on shady and sunny slopes in the eastern Qinghai-Xizang Plateau[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024: 60-61.

[10] 高家辉 , 马茜芮 , 罗光成 , 等 . 云冷杉针叶混交林主要针叶树种早晚材径向生长对多因子的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(10):16-27.
Gao J H, Ma X R, Luo G C, et al. Response of early and late wood growth of main coniferous species to multiple factors in spruce fir coniferous mixed forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(10):16-27.

[11] 刘泽 , 李君 , 石松林 , 等 . 四川亚丁自然保护区不同林线树种径向生长对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(5):1177-1186.
Liu Z, Li J, Shi S L, et al. Response of radial growth of different timberline species to climate change in Yading nature reserve, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(5): 1177-1186.

[12] 薛盼盼 , 缪宁 , 罗建琼 , 等 . 升温突变对川西不同坡向和海拔岷江冷杉径向生长的影响 [J]. 生态学报 ,2023,43(24):10263-10273.
Xue P P, Miao N, Luo J Q, et al. Effects of abrupt warming on radial growth of Minjiang fir at different slope aspects and elevations in western Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(24): 10263-10273.

[13] 胡文斌 , 陈治霖 , 刘建成 , 等 . 岷江源区百年来汛期降水气候特征 [J]. 长江科学院院报 ,2025,42(1):57-63,81.
Hu W B, Chen Z L, Liu J C, et al. Characteristics of flood season precipitation over the past century in the headwater region of Minjiang river[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(1):57-63,81.

[14] 蔡苗 , 李雅 , 卢杰 . 树木径向生长对气候变化的时空响应研究进展 [J]. 农业与技术 ,2025,45(9):73-76.
Cai M, Li Y, Lu J. Advances in research on the spatiotemporal response of tree radial growth to climate change[J]. Agriculture and Technology,2025,45(9):73-76.

[15] Yang J, El-Kassaby Y A, Guan W B. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, southwest China[J]. Scientific Reports,2020,10:16465.

[16] 松潘县志编纂委员会 . 松潘县志 [M]. 北京 : 民族出版社 , 1999:111-113.
Songpan County Editorial Committee. Songpan County annals[M]. Beijing: Publishing House of Minority Nationalities, 1999:111-113.

[17] Dukić V, Mirković M, Stajić B, et al. Comparative analysis of the influence of climate factors on the radial growth of autochthonous pine species (*Pinus* spp.) in central Bosnia and Herzegovina[J]. Sumarski List, 2022(7-8):319-331.

[18] 李君 , 刘泽 , 王牌 , 等 . 西藏珠峰地区乔松径向生长对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报 ,2024,35(5):1205-1213.
Li J, Liu Z, Wang P, et al. Response of radial growth of *Pinus wallichiana* to climate change in Mount Qomolangma, Xizang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(5): 1205-1213.

[19] 苟晓霞 , 张同文 , 喻树龙 , 等 . 不同生境下圆柏径向生长的气候响应 [J]. 生态学杂志 ,2021,40(6):1574-1588.
Gou X X, Zhang T W, Yu S L, et al. Response of radial growth of *Juniperus seravschanica* to climate changes in different environmental conditions[J]. Chinese Journal of Ecology,2021, 40(6):1574-1588.

[20] 杜苗苗 , 张芬 , 勾晓华 , 等 . 祁连山中东部青海云杉径向生长对气候变暖的响应差异 [J]. 冰川冻土 ,2022,44(1):14-23.
Du M M, Zhang F, Gou X H, et al. Different responses of radial growth of *Picea crassifolia* to climate warming in the middle and eastern Qilian mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(1):14-23.

[21] Fang O Y, Alfaro R I, Zhang Q B. Tree rings reveal a major episode of forest mortality in the late 18th century on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Global and Planetary Change,2018,163:44-50.

[22] 刘清源 , 史倩 , 同小娟 , 等 . 水热条件对华北落叶松人工林径向生长的影响 [J]. 生态学报 ,2025,45(10):4900-4915.
Liu Q Y, Shi Q, Tong X J, et al. The impact of hydrothermal conditions on the radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(10): 4900-4915.

[23] 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 B D, Zhang Y D, Wang X C. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slope aspects to rapid warming in western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(2):354-364.

[24] 李思其 . 长白山不同坡向和海拔岳桦径向生长差异及其气候敏感性研究 [D]. 长春 : 东北师范大学 ,2019:45-46.
Li S Q. Study on radial growth difference and climate sensitivity of *Betula ermanii* in different slopes and elevations of Changbai mountain[D]. Changchun: Northeast Normal University,2019: 45-46.

[25] 王巍樾 , 万艳芳 , 白雨诗 , 等 . 坡向对六盘山人工华北落叶松林径向生长 - 气候关系的影响 [J]. 生态学报 ,2024,44(16): 7290-7300.
Wang W Y, Wan Y F, Bai Y S, et al. Effect of slope aspect on the relationship between radial growth and climate of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation in Liupan mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(16):7290-7300.

[26] 王玲玲 , 勾晓华 , 夏敬清 , 等 . 树木形成层活动及其影响因素研究进展 [J]. 应用生态学报 ,2021,32(10):3761-3770.
Wang L L, Gou X H, Xia J Q, et al. Research progress on cambial activity of trees and the influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,32(10):3761-3770.

[27] 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 J, Bai H Y, Zhao P, 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.

[28] 高娜 , 李书恒 , 白红英 , 等 . 秦岭牛背梁自然保护区巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 树轮宽度对气候变化响应的分离效应 [J]. 生态学杂志 , 2016,35(8):2056-2065.
Gao N, Li S H, Bai H Y, et al. Response divergence of *Abies fargesii* tree-ring widths to climate variation in the Niubeiliang nature reserve of the Qinling mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(8):2056-2065.

[29] 李名勇 , 段建平 , 王丽丽 . 川西高原四川红杉树轮宽度和密度对气候的响应分异性 [J]. 第四纪研究 ,2024, 44(4):963-975.
Li M Y, Duan J P, Wang L L. Differences in responses of tree-ring width and density of *Larix mastersiana* to climatic factors in the west Sichuan Plateau[J]. Quaternary Sciences,2024,44(4): 963-975.

[30] 乔晶晶 . 小兴安岭南麓两种针叶树种径向生长对气候变化响应及温度重建 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2023:54-56.
Qiao J J. Radial growth of two coniferous species in response to climate change in the southern Lesser Khingan mountains and its temperature reconstruction[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2023:54-56.

[31] 郑壮鹏 . 湿润亚热带典型针叶树种径向生长及其对气候的响应研究 [D]. 福州 : 福建师范大学 ,2023:101-102.
Zheng Z P. Radial growth and climate response of typical coniferous tree species in humid subtropics region[D]. Fuzhou: Fujian Normal University,2023:101-102.

[32] 李宝 , 程雪寒 , 吕利新 . 西藏朗县地区不同龄级高山松林木径向生长对火干扰的响应 [J]. 植物生态学报 ,2016,40(5): 436-446.
Li B, Cheng X H, Lyu L X. Responses of radial growth to fire disturbance in alpine pine (*Pinus densata*) of different age classes in Nang County, Xizang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2016,40(5):436-446.

[33] Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, et al. Growth variation in *Abies georgei* var. *smithii* along altitudinal gradients in the Sygera mountains, southeastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Trees, 2010,24:363-373.

[34] 王振波 , 王淼 , 王丰 , 等 . 乌兰地区青海云杉和祁连圆柏的树轮宽度 : 水分记录还是温度记录 ?[J]. 第四纪研究 ,2024, 44(4):949-962.
Wang Z B, Wang M, Wang F, et al. Is there a temperature or hydroclimate signal in tree-ring width of Qinghai spruce and Qilian juniper in the Wulan region, Qinghai Province?[J]. Quaternary Sciences,2024,44(4):949-962.

[35] Leal S, Melvin T M, Grabner M, et al. Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate[J]. Boreas,2007,36:426-440.

[36] Affolter P, Büntgen U, Esper J, et al. Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings[J]. European Journal of Forest Research,2010,129:289-298.

[37] 王玲玲 . 祁连山东部三个针叶树种年内径向生长及其对气候要素的响应 [D]. 兰州 : 兰州大学 ,2023:4-6.
Wang L L. Intra-annual radial growth of three coniferous species and their responses to climate factors in the eastern Qilian mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2023:4-6.

[38] 刘欣 . 不同坡向兴安落叶松径向生长对气候变化响应 [D]. 哈尔滨 : 东北林业大学 ,2016:25-34.
Liu X. Response of *Larix gmelinii* radial growth to climate change for different slope direction[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2016:25-34.

[39] Piovesan G, Bernabei M, Di Filippo A, et al. A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of central Italy[J]. Dendrochronologia,2003,21(1):13-22.

[40] Wu G J, Xu G B, Chen T, et al. Age-dependent tree-ring growth responses of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) to climate: a case study in the Tianshan mountain, China[J]. Dendrochronologia, 2013,31:318-326.

[本文编校：张雨朦]