



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目: 川西高原青杨径向生长对气候变化的响应
作者: 梁振满, 李奇, 李金豹, 欧峻峰, 张旭, 高聪, 李腾
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202510.003
收稿日期: 2025-05-13
网络首发日期: 2025-08-27
引用格式: 梁振满, 李奇, 李金豹, 欧峻峰, 张旭, 高聪, 李腾. 川西高原青杨径向生长对气候变化的响应[J/OL]. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202510.003>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

川西高原青杨径向生长对气候变化的响应

梁振满¹ 李 奇¹ 李金豹^{2,3} 欧峻峰^{4,5} 张 旭² 高 聪² 李 腾¹✉

(¹ 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006; ² 香港大学地理系, 中国香港 999077; ³ 香港大学深圳研究院, 广东深圳 518063; ⁴ 密歇根大学生态与进化生物学系, 美国密歇根州安娜堡 48109; ⁵ 密歇根大学全球变化生物学研究所, 美国密歇根州安娜堡 48109)

*通信作者 E-mail: liteng@gzhu.edu.cn

摘要 为探究气候变暖背景下川西地区阔叶树种的生长特征及其对气候因子的响应, 本文以川西高原九寨沟地区的中国特有树种青杨为研究对象, 建立研究区青杨树轮宽度标准化年表, 分析其在 1959—2022 年间的径向生长与气候因子的响应关系, 通过滑动相关分析探讨其气候响应的稳定性, 并采用径向生长变化百分率 (PGC) 识别生长释放与抑制事件。结果表明: 青杨树木年轮宽度与 5—6 月平均最高气温 ($r=0.525$)、平均气温 ($r=0.548$) 及平均最低气温 ($r=0.341$) 呈显著正相关, 而与同期降水量 ($r=-0.260$)、相对湿度 ($r=-0.579$) 和云层覆盖率 ($r=-0.483$) 呈显著负相关。基于径向生长变化百分率识别出 3 次显著生长释放事件 (1937—1940 年, 平均 PGC 为 32.8%; 1977—1978 年, 平均 PGC 为 42.2%; 1999—2004 年, 平均 PGC 为 43.3%) 和 1 次显著生长抑制事件 (2008—2010 年, 平均 PGC 为 -28.9%)。滑动相关分析表明, 青杨径向生长与主要气候因子的相关性在 1970 年代发生明显转变, 与生长季温度的相关性由负相关转为显著正相关, 而与相对湿度和自校准帕尔默干旱指数 (scPDSI) 的相关性则由正相关转为显著负相关, 表明川西青杨对气候因子的非稳定性响应, 以及生长季高温低湿的气候条件更有利于其径向生长。

关键词 树木年轮; 径向生长; 阔叶树; 气候变化; 川西高原; 青杨

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202510.003

Responses of radial growth of *Populus cathayana* to climate change in the western Sichuan Plateau, ChinaLIANG Zhenman¹, LI Qi¹, LI Jinbao^{2,3}, Tsun Fung Au^{4,5}, ZHANG Xu², GAO Cong², LI Teng¹✉

(¹ School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; ² Department of Geography, University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; ³ HKU Shenzhen Institute of Research and Innovation, Shenzhen 518063, Guangdong, China; ⁴ Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Michigan, Ann Arbor 48109, Michigan, USA; ⁵ Institute for Global Change Biology, University of Michigan, Ann Arbor 48109, Michigan, USA)

Abstract In the context of global warming, we investigated the growth dynamics and climatic response mechanisms of broadleaf tree species in the Jiuzhaigou region, western Sichuan Plateau, with a focus on *Populus cathayana*, an endemic species in China. We developed a standardized tree-ring width chronology to analyze radial growth response to climatic factors from 1959 to 2022. Moving correlation analysis was applied to assess the stability of climate-growth relationships, and growth change percentage (PGC) method was used to identify growth release and suppression events. The results showed that the tree-ring width of *P. cathayana* was significantly positively correlated with May–June average maximum temperature ($r=0.525$), mean temperature ($r=0.548$), and average minimum temperature ($r=0.341$), but significantly negatively correlated with precipitation ($r=-0.260$), relative humidity ($r=-0.579$), and cloud cover ($r=-0.483$) during the same period. PGC analysis revealed three significant growth release events (1937–1940, average PGC=32.8%; 1977–1978, average PGC=42.2%; 1999–2004, average PGC=43.3%) and one significant growth suppression event (2008–2010, average PGC=-28.9%). Moving correlation analysis revealed a marked shift in climate-growth relationship during the 1970s, characterized by the transition of growing-season temperatures from negative to significantly positive, while relative humidity and self-calibrated Palmer drought severity index (scPDSI) correlations shifted from positive to significantly negative. These findings underscore the

收稿日期: 2025-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42105155)、香港研究资助局项目 (17317722) 和国家地理学会项目 (EC-95776R-22) 资助。

作者简介: 梁振满, 男, 1996 年生, 硕士研究生。主要从事川西地区树轮气候学研究。E-mail: liangzhenman596@163.com

网络首发时间: 2025-08-27 13:34:11 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/21.1253.Q.20250826.1555.005>

non-stationary climatic responses of *P. cathayana* in western Sichuan, suggesting that warmer and drier conditions in the growing season favor its radial growth.

Key words tree ring; radial growth; broadleaf tree; climate change; western Sichuan Plateau; *Populus cathayana*

根据 IPCC 第六次评估报告 (AR6), 当前全球平均温度较工业化前水平已升高 1.09℃, 超过 1.5℃ 阈值可能导致具有碳汇功能的关键生态系统向碳源转变的风险显著增加^[1]。全球气候变暖加速变化背景下, 作为全球气候变化的“放大器”, 青藏高原在过去 50 年以年均约 0.04℃ 的速率持续升温^[2-3], 其生态系统脆弱性对亚洲季风区水热格局具有链式响应。青藏高原东南缘的川西高原是东亚季风、南亚季风与高原季风的交汇区, 孕育了丰富的森林资源, 区域树种多样, 形成了一个生态气候敏感区。在全球气候变暖背景下, 该区域温度和降水格局变化已显著影响树木生长, 导致部分敏感性树种出现衰退甚至消亡, 进而改变森林生态系统结构, 影响森林碳汇在全球碳循环中发挥作用^[4-6]。树木年轮具有分辨高、定年准确、气候响应敏感等优势, 是森林生态学和古气候变化研究的重要代用指标^[7-11]。川西地区的树轮研究取得了丰富的成果, 但现有研究主要集中于针叶树种^[12-16], 而作为生态系统重要组成部分的阔叶树种, 相关气候响应研究仍较少^[17-18]。因此, 阐明阔叶树种如何响应快速变化的水热条件, 是揭示川西地区森林生态系统碳汇动态的关键。

近年来, 许多学者在不同地区利用杨属 (*Populus*) 阔叶树种开展了树木年轮学研究, 显示出其在气候变化研究中的应用潜力。贺敏等^[19]在内蒙古大兴安岭南段的研究指出, 山杨 (*P. davidiana*) 对气温上升高度敏感, 温度升高显著抑制其径向生长; 杨银科等^[20]发现, 新疆艾比湖流域胡杨 (*P. euphratica*) 树轮宽度与冬季降水量呈显著正相关, 表明水分供给是干旱区胡杨生长的主要限制因子; 刘亚玲等^[21]在河北坝上地区研究发现, 小叶杨 (*P. simonii*) 人工林在树龄增长过程中对水分的依赖逐渐增强, 干旱胁迫加剧了生长衰退; Edmondson 等^[22]在美国北达科他州利用棉白杨 (*P. deltoids* subsp. *monilifera*) 建立了长达 368 年的年轮年表, 揭示降水量和土壤湿度是该地区白杨生长的关键因子。综上, 杨属树种对气候因子的响应在不同区域表现出显著差异, 主要受两方面因素影响: 一是树种生态适应特征上的差异, 决定了其对气候因子的敏感性和响应模式; 二是区域气候背景的主导作用, 水分是干旱区的主要限制因子, 而在高纬度或高海拔地区温度则成为关键影响变量。因此, 综合识别气候因子的影响是厘清不同区域杨属阔叶树种树木径向生长机制的关键。

青杨 (*P. cathayana*) 为杨柳科 (*Salicaceae*) 杨属 (*Populus*) 乔木, 是中国特有树种, 广泛分布于中国辽宁、华北、西北、四川、云南等地区, 常见于海拔 1500~3900 m 的山地与峡谷带^[23]。该树种在中国天然林中占据较大分布面积, 尤其在西部高海拔地区, 常形成纯林, 或与桦树、冷杉等共生构成混交林。青杨具备抗寒、抗旱、耐贫瘠等生态适应特征, 广泛用于水土保持与山区植被恢复工程, 在维系高山峡谷生态系统稳定性方面具有重要生态功能。因其生长迅速、材质优良, 亦在部分地区被培育为经济型用材林, 兼具生态与经济双重价值。此外, 青杨树木年轮清晰易辨, 具备树木年轮年代学研究潜力。然而, 川西地区青杨如何响应气候变化仍不明晰。因此, 本研究利用树木年代学方法建立研究区青杨年表, 通过相关分析及滑动相关分析探讨树木生长对气候因子响应特征及其稳定性, 识别生长释放与抑制事件, 以厘清区域气候变化对青杨生长的影响。本研究旨在加强中国阔叶树种树轮研究网络, 为探明青杨未来是否具备开展古气候重建研究潜力提供科学参考, 也为全球变化背景下川西森林生态系统可持续发展和管理提供科学支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省九寨沟地区, 地处川西高原东北部边缘, 海拔 2000~4700 m, 属高原湿润气候 (图 1)。研究区土壤类型为棕壤, 自然植被呈现明显的垂直地带性分布, 海拔在 2000 m 以稀疏耐旱灌丛及部分落叶阔叶树种为主, 2000~2800 m 海拔为针阔叶混交林带, 主要树种有青杨 (*Populus cathayana*)、水青树 (*Tetracentron sinense*)、糙皮桦 (*Betula utilis*) 和红豆杉 (*Taxus*

wallichiana) 等, 2800~3500 m 为典型针叶林区, 优势种有岷江冷杉 (*Abies faxoniana*)、紫果云杉 (*Picea purpurea*) 和鳞皮云杉 (*Picea retroflexa*); 而海拔 3500 m 以上则主要为高山灌丛草甸带。青杨在研究区内常见于山谷沿岸或水源附近, 主要生长在平坦地面上, 坡度多在 3~36°, 呈群落状分布, 其树干通直, 生长迅速, 具有发达的根系及较强的萌蘖能力。青杨幼树树皮光滑、呈绿色或灰白色, 随年龄增长逐渐转为暗灰色并出现纵裂, 具有较强的喜光性和抗寒性, 花期集中在 3—5 月, 果期为 5—7 月。青杨对土壤适应性强, 可在瘠薄环境中生存, 但最适宜生长于土层深厚、肥沃且排水良好的环境中。

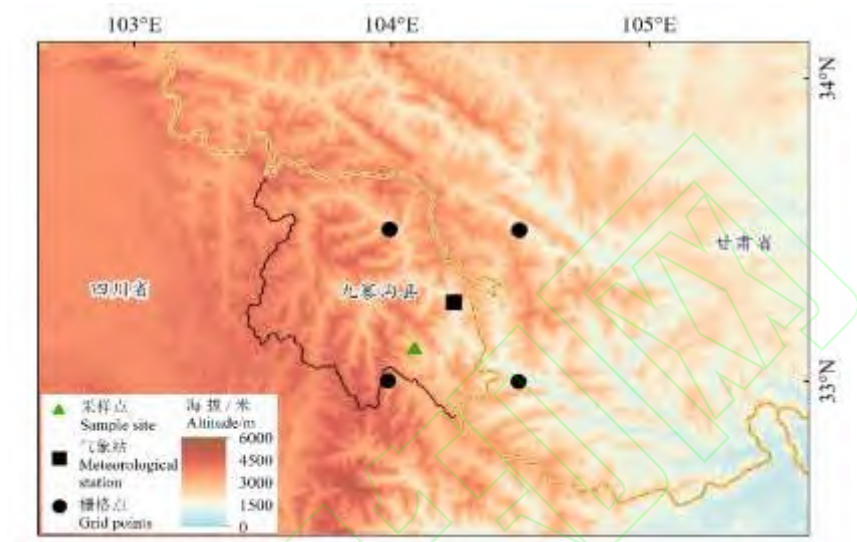


图1 树木年轮采样点和气象站位置
Fig.1 Location of tree-rings sampling sites and meteorological stations.

该图基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作, 底图无修改 The map was based on the standard map with the drawing review No. GS(2024)0650, and the base map was not modified.

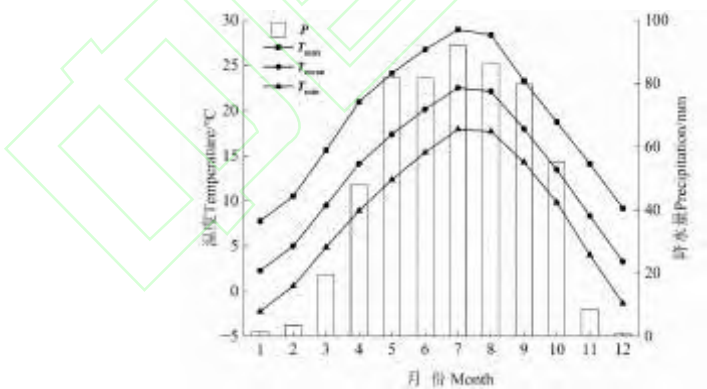


图2 1959—2022 年九寨沟气象站气候数据
Fig.2 Climate data of the Jiuzhaigou meteorological station from 1959 to 2022.

P: 降水量 Precipitation; T_{max}: 平均最高气温 Mean maximum temperature; T_{mean}: 平均气温 Mean temperature; T_{min}: 平均最低气温 Mean minimum temperature. 下同 The same below.

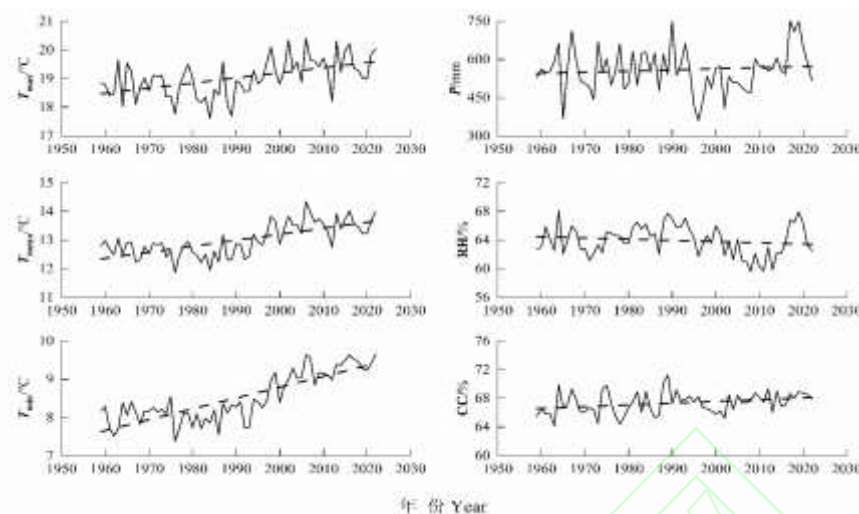


图3 九寨沟县 1959—2022 年气候因子年际变化趋势

Fig.3 Annual trends of climatic factors in Jiuzhaigou County from 1959 to 2022.

RH: 相对湿度 Relative humidity; CC: 云层覆盖率 Cloud cover. 下同 The same below.

1.2 气候数据

气候数据选取距离采样点较近的气象站点——九寨沟气象站 ($33^{\circ}16' N$, $104^{\circ}15' E$, 海拔 1442 m)。数据来源中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)，包括 1959—2022 年逐月最高气温、平均气温、最低气温、降水量和相对湿度 5 个气候指标 (图 2)。为进一步分析云量及干湿状况对青杨生长的潜在影响，选取距离采样点最近的 4 个栅格点，在 KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>) 下载云层覆盖率 (cloud cover, CC) 和自校准帕尔默干旱程度指数 (self-calibrated Palmer drought severity index, scPDSI) 数据；在全球 SPEI 数据库 (https://spei.csic.es/spei_database) 下载标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 数据。研究区年均温 $12.9^{\circ}C$ ，年降水量 511.2 mm (图 2)。研究区多年平均最高气温、平均气温和平均最低气温均呈显著升温趋势 ($P < 0.01$)，其升温速率分别为 0.19 、 0.21 和 $0.28^{\circ}C \cdot (10 a)^{-1}$ ；降水量和云层覆盖率呈现出轻微的增加趋势，而相对湿度年际变化呈现出轻微的下陷趋势 (图 3)。

1.3 树轮数据及年表建立

本研究选取四川省九寨沟县的原始森林区作为采样点 ($33^{\circ}06' N$, $104^{\circ}06' E$)，海拔 2000 m。选择生长集中、立地环境良好且受人类活动干扰较少的区域作为采样点。使用内径 5.1 mm 生长锥在树木胸径处采集树芯，每棵树采集 2~3 个样芯，共采集 31 棵树 80 根树芯，样本树胸径范围在 29.8~73.5 cm。严格按照树木年代学标准化流程^[24]对树轮样品进行预处理，经干燥、粘贴后，依次使用 120~1000 目砂纸对样本进行打磨，直至确保在显微镜下能观察到清晰的树轮界限。在显微镜下进行交叉定年，借助 Velmex 树轮宽度测量仪和 MeasureJ2X (1.4.2) 测量软件对树芯样本的年轮宽度进行逐年测量，并通过 COFECHA^[25]程序对测量结果进行检验和校正，最终选取 31 棵树 62 根树芯样本作为树轮数据。

树木的生长会随着树龄的增长而逐渐减慢，并受到气候和非气候因素影响。为了提取树木生长中的气候信号，需要对树轮数据进行去趋势和标准化处理^[26]。本研究采用 R 语言 dplR 扩展包^[27]中修正的负指数函数方法 (ModNegExp) 对树轮宽度序列进行去趋势，通过 chron.stabilized 函数建立了研究区青杨方差稳定的树轮宽度标准化年表 (standard chronology, STD)。

1.4 数据处理

运用 SPSS26.0 软件对青杨 STD 年表与各气候因子进行 Pearson 相关性分析并计算月份最佳气候

窗口。通过 treeclim 包^[28]对标准年表与气候因子进行滑动相关分析（滑动区间为 31 年），根据 bootstrap 法自举重复计算显著性和置信区间。通过 dplR 包将树轮宽度数据转换为基底面积增量（basal area increment, BAI），并利用树木径向生长变化百分率（percentage growth change rate, PGC）来辨识径向生长变化中的生长抑制和生长释放事件^[29–30]。公式如下：

$$PGC(\%)=[(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

式中：PGC 为树木生长变化的百分率，滑动窗口为 5 年；M₁ 为前 5 年包含当年的 BAI 平均值，M₂ 为后 5 年不含当年的年 BAI 平均值，正值表示树木在相应时期的生长释放，负值则表示在相应时期生长抑制。采取与 BAI 生长变化百分率相同的方法，计算 4 个生长季气候因子（最高气温、平均气温、降水量和相对湿度）的变化百分率以探讨气候因子对青杨生长抑制和生长释放事件的影响。数据处理用 R Studio 4.3.2 完成，利用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 青杨树轮宽度年表统计特征

利用九寨沟地区的青杨树轮样本，建立研究区标准化（STD）年表（图 4），以保存更多低频气候信号，年表统计特征值见表 1。青杨 STD 年表的时间长度为 160 年（1863—2022 年），轮宽指数为 0.35~1.91，最大值出现在 2008 年，为 1.91，最小值在 1967 年，为 0.35；标准差为 0.24，平均敏感度为 0.19。其中，平均敏感度是树轮数据的特征变化对该地区气候变化反应的敏感程度，值越大表明气候因子对树木生长的限制作用越显著。一阶自相关系数为 0.48，表明研究区前期气候及环境对青杨当年的生长量影响较大；样本总体代表量（EPS）为 0.96，表明树芯样本能有效反映该区域青杨年表的可靠性，其中超过阈值 0.85 的年份为 1890 年^[31]。信噪比（SNR）为 11.40，说明年表包含的气候信息量较多，适于树木生长气候响应分析。

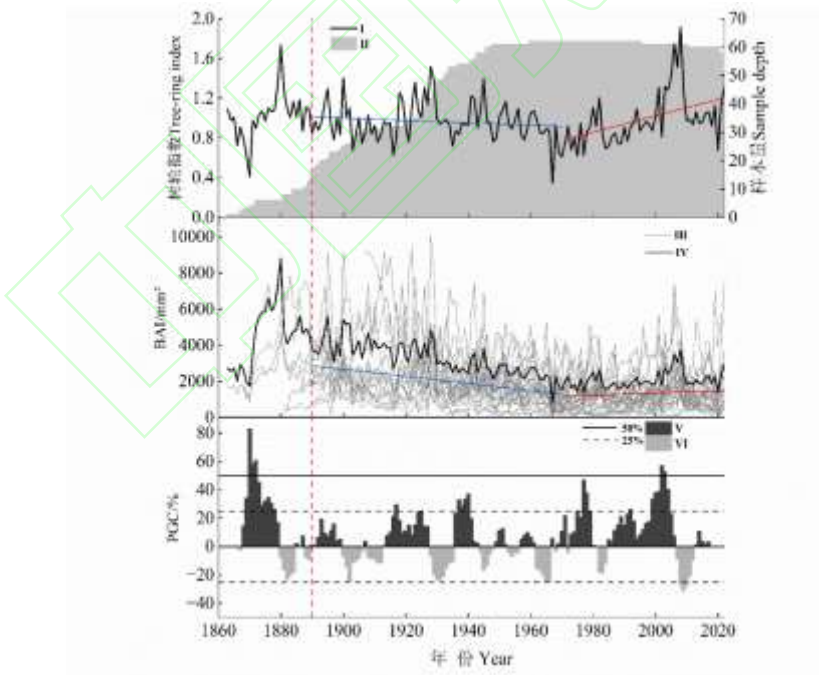


图 4 青杨树轮宽度指数、基底面积增量（BAI）和生长变化百分率（PGC）
Fig.4 Tree-ring width index, basal area increment (BAI), and percent change in *Populus cathayana* growth (PGC).

垂直虚线表示 EPS>0.85 Vertical dashed lines indicated EPS>0.85. I：STD 年表 Chronology of the STD；II：样本量 Sample size；III：单个树芯 BAI 值 Single tree core BAI value；IV：青杨 BAI 平均值 Average BAI value of *P. cathayana*；V：生长释放 Growth release；VI：生长抑制 Growth suppression.

表1 青杨树标准年表统计参数
Table1 Statistical parameters of the standard chronology of *Populus cathayana*

统计类型 Statistics type	标准化年表 Standardized chronology (STD)
年表总长度 Time span	1863—2022
EPS>0.85 的时间段 Time span with EPS >0.85	1890—2022
标准方差 Standard deviation	0.25
平均敏感度 Mean sensitivity	0.19
一阶自相关系数 First-order autocorrelation coefficient	0.48
序列平均相关性 Mean correlation all-series	0.23
树芯间平均相关性 Mean correlation within-tree	0.57
树组间平均相关性 Mean correlation between-tree	0.23
信噪比 Signal to noise ratio	11.40
样本总体代表量 Expressed population signal	0.96

2.2 青杨径向生长对气候因子的响应

由图 5 可以看出，青杨径向生长与研究区气温因子整体上呈正相关，其与当年 3 月、5—7 月平均最高气温，与 12 月、当年 3 月、5—7 月、9—10 月平均气温，和上年 12 月、当年 1—3 月、5—10 月平均最低气温呈显著正相关，尤其与当年 3 月、5—7 月、9—10 月平均气温，当年 3 月、5 月平均最高气温，和当年 10 月平均最低气温呈极显著正相关。

青杨径向生长与当年 2 月降水量呈极显著正相关，与当年 5 月降水量呈显著负相关。青杨 STD 年表与当年 5—7 月的相对湿度呈显著负相关，其中，与当年 5 月的相对湿度呈极显著负相关。青杨 STD 年表与当年 1 月云层覆盖率呈极显著正相关，和当年 4—7 月云层覆盖率呈显著负相关。

基于树木生长季节性特点，对生长季月份进行多月组合分析，发现青杨径向生长与 5—6 月气候因子呈现最高相关系数。STD 年表与 5—6 月平均最高气温 ($r=0.525$)、平均气温 ($r=0.548$) 和平均最低气温 ($r=0.341$) 均呈极显著正相关，与 5—6 月相对湿度 ($r=-0.579$) 和云层覆盖率 ($r=-0.483$) 则呈极显著负相关，与 5—6 月降水量 ($r=-0.260$) 呈显著负相关。

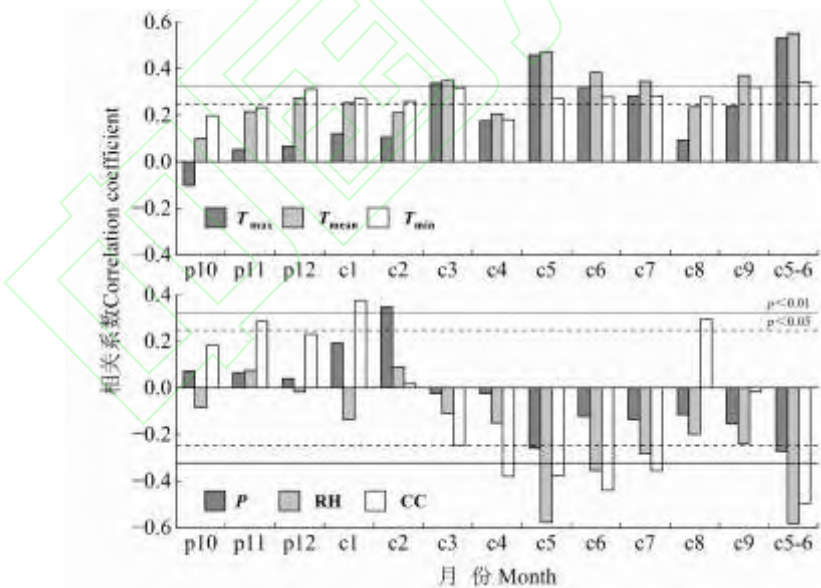


图 5 青杨树轮宽度年表与月均值气候因子的相关系数
Fig.5 Correlation coefficients between *Populus cathayana* tree-ring width chronology and monthly climatic factors.
p: 前一年 Previous year; c: 当年 Current year. 下同 The same below.

2.3 青杨径向生长对气候因子响应的动态变化

青杨径向生长与气候因子的滑动相关分析表明（图 6），青杨 STD 年表与生长季温度的正相关关系在 1975 年之后普遍有逐渐增强的趋势，尤其是与 5—6 月平均最高气温和平均气温的显著性正相关关系更加明显；而对于当年 7—9 月气温相关关系则由负相关或弱正相关在 1970 年之后逐渐转变为显

著正相关。此外,青杨 STD 年表与 5 月的降水量和 SPEI 存在负相关关系,尽管负相关关系存在波动但整体上仍保持稳定。同样,5 月相对湿度与青杨 STD 年表的负相关关系也保持高度稳定,而 7—9 月的相对湿度在 1976 年前后也经历了显著的转变,由原来的正相关关系转变为负相关关系。通过 STD 年表与云层覆盖率滑动相关分析发现,这两者的关系也在 1970 年发生了变化,与生长季(3—7 月)的负相关呈现逐渐增强的趋势;青杨 STD 年表与 scPDSI 之间也存在明显的相关关系的转变,自 1975 年之后生长季 scPDSI 与青杨 STD 年表之间呈显著负相关。

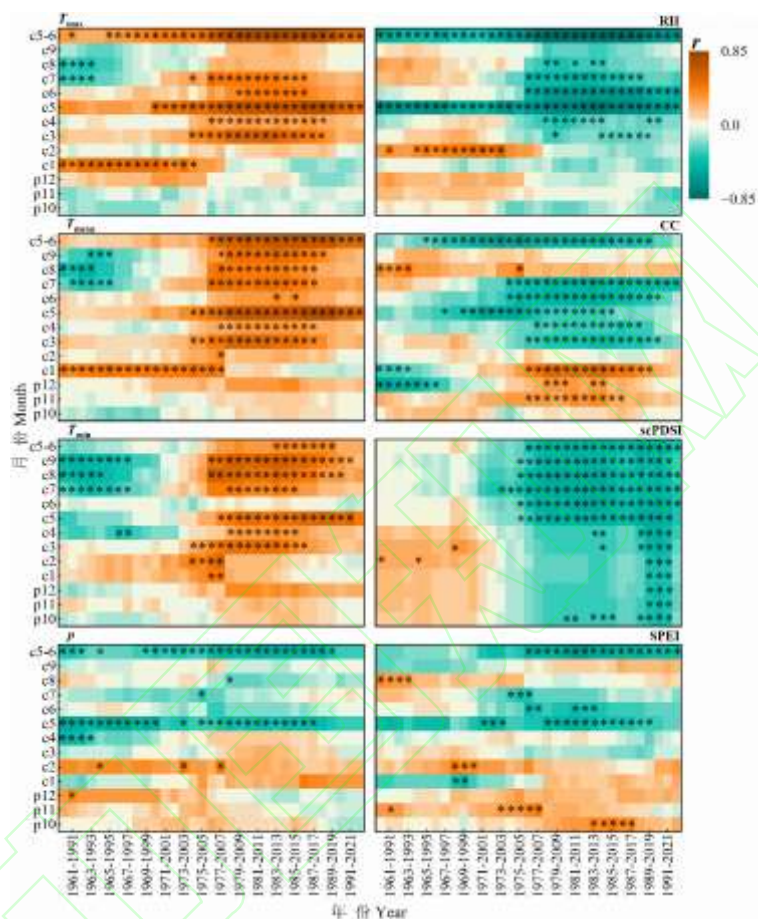


图 6 青杨树轮宽度年表与气候因子 31 年滑动相关分析

Fig.6 31-year window moving correlations of *Populus cathayana* tree-ring width chronology and climate factors.

scPDSI: 自校准帕默尔干旱强度指数 Self-calibrated Palmer drought severity index; SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index. * $P < 0.05$.

2.4 青杨生长释放与抑制

根据 Black 等^[32]生长释放标准判断方法,当|PGC|值 $<25.0\%$ 时,认为树木处于正常生长状态,|PGC|值 $\geq 25.0\% \sim 50.0\%$ 时,持续时间 2 年或 2 年以上标记为中度释放或抑制事件,|PGC|值 $\geq 50.0\% \sim 100.0\%$ 时,持续时间 2 年或 2 年以上标记为主要释放或抑制事件。根据以上方法将青杨生长释放年份划分为 1937—1940 年、1977—1978 年和 1999—2004 年共 3 次释放事件,2002 年、2003 年的 PGC 值达到最大值,分别为 57.0%、52.0%,属于主要释放事件;而抑制事件仅发生于 2008—2010 年(中度抑制事件),其中 2009 年生长抑制 PGC 值降至-31.0%(图 7)。川西青杨在年表可信区间 1890—2022 年期间,树木的生长受到生长释放和抑制信号交替影响,整体而言,生长释放的年份要多于生长抑制的年份,且树木释放信号要强于生长抑制信号。

从图 7 可以看出,降水量的变化率波动幅度较大,其范围为-26.5%~42.0%;相比之下,其他因子的变化率则相对变化较小,平均最高气温、平均气温和相对湿度变化率波动范围分别为:-

6.2%~4.4%、-5.7%~6.0%和-9.6%~8.6%。与 BAI 进行相关性分析,发现相关系数均呈极显著相关,其中 5—6 月平均最高气温 ($r=0.772$), 5—6 月平均气温 ($r=0.731$)与 BAI 生长变化率呈极显著正相关,同时 5—6 月降水量 ($r=-0.703$)和 5—6 月相对湿度 ($r=-0.871$)对 BAI 生长变化率也产生显著负面影响。

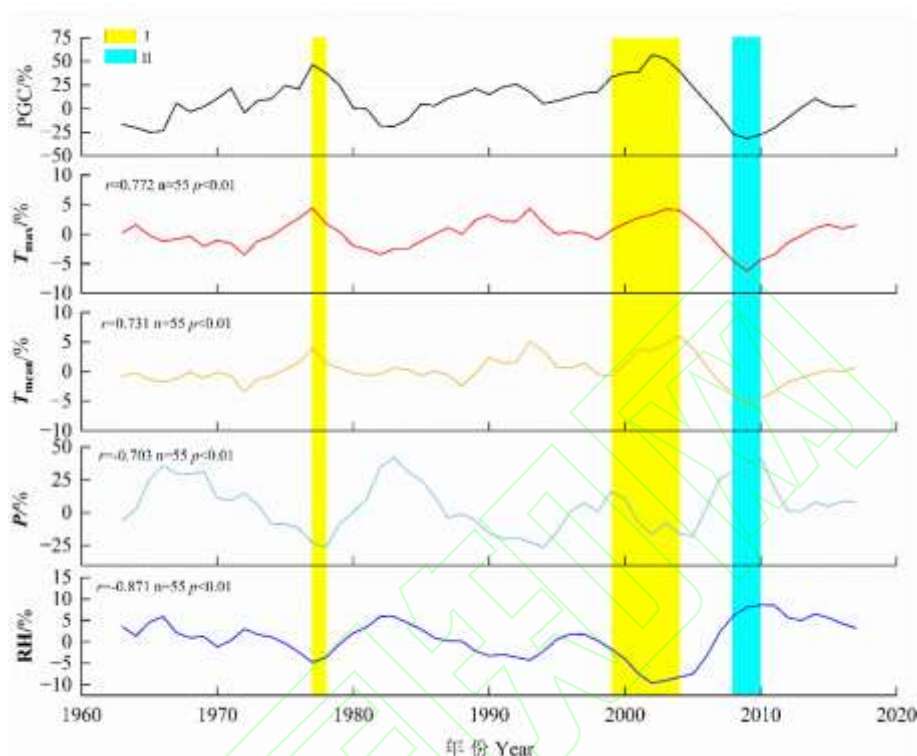


图 7 青杨生长变化百分率与 5—6 月气候因子变化率

Fig.7 Growth change percentage of *Populus cathayana* and change rate of May-June climate factors.

I: 生长释放 Growth release; II: 生长抑制 Growth suppression. PGC: 生长变化百分率 Growth change percentage.

3 讨论

3.1 青杨径向生长对气候因子的响应

青杨属深根、喜热喜阳性阔叶树种。3 月是青杨生长季初期,此时木质部细胞开始分裂;随着温度升高,树木的光合速率增强,有利于树木形成层的活动,为树木提供营养物质^[33]。同时,3 月的温度升高有助于加速土壤解冻,促进青杨形成早材。进入 5—7 月,研究区的平均气温可达 20℃,最高气温超过 26℃,此时青杨进入生长旺盛期。高温有助于提高酶的活性,加快光合作用的速率^[34],促进细胞快速发育,产生更多碳水化合物,为青杨的生长发育提供充足的营养,利于青杨生长并使其形成宽轮。这一现象与九寨沟弓杠岭林线上的岷江冷杉^[35]研究结果一致。此外,研究区 5—7 月进入雨季,此时高温会增强树木的蒸腾作用,有利于土壤水分蒸发,减缓雨季过量降水对树木根系呼吸的抑制作用,从而促进青杨树木生长^[36-37]。然而,研究结果与川西卧龙地区和马尔康地区的树木研究结果存在明显差异^[38-39],青杨并未表现出升温后树木“响应分异”的现象,表明不同树种对升温的响应结果存在差异。

青杨径向生长与当年 2 月降水量呈显著正相关。2 月冰雪融化能够提供树木早期生长所需的水分,有利于养分的生成和吸收,促进树木的春季生长复苏^[40]。本研究表明,年表与 5 月降水量呈显著负相关,因为青杨生长地接近水源,环境较为湿润,额外的降水对青杨的生长起抑制作用^[41]。此外,过多的降水代表着较短的日照时长,不利于树木生长期间营养物质的积累和木质化进程,容易形成较

窄的年轮^[42]。这与美国中西部大平原的杨属树种研究结果不同^[22]，后者发现，生长季的杨树与降水量呈显著正相关，可能因为美国中西部地区为大陆性气候，年降水量相对较低，夏季炎热干燥，适当的降雨可以补充树木生长所需的水分。

本研究中，除上一年 11 月和当年 2 月外，川西青杨的径向生长与其他月份相对湿度均呈负相关，其中与 5—7 月相对湿度呈显著负相关。5—7 月是研究区降水较多的时期，研究区湿润的环境条件对青杨径向生长产生抑制作用。降水量的增多会导致土壤湿度增大，不利于青杨的根部呼吸，从而抑制其径向生长^[43]。川西青杨与 3—7 月云层覆盖率呈显著负相关，云层覆盖量的增加会削弱太阳辐射量和日照时间，降低树木生长所需的光合有效辐射，最终抑制树木的生长^[44]。青杨 8 月已开始进入生长季后期，木质部细胞进入成熟阶段，较高的最低气温有助于延长细胞分裂与扩展的时间，从而促进晚材的形成^[45]。此外，适度的云量增加可以削弱日照强度来缓解叶片热应激，降低蒸腾和呼吸损耗，进而促进净碳积累与径向生长^[46]。

3.2 青杨径向生长稳定性

本研究中，在 1970 年之前，青杨的生长与当年 7—9 月夏季气温存在显著负相关，同时与当年 7—9 月的云层覆盖率和相对湿度呈正相关。这表明在 1970 年之前，高温胁迫是限制川西青杨生长的关键要素。1970 年后，青杨对夏季温度的负相关性逐渐减弱，并于 1975 年转为正相关。这一转变可能与研究区降雨频率和云层覆盖量的增加有关，云层覆盖和湿度增加可能通过减弱光强和降低蒸腾压力，缓解高温对树木的生理胁迫，导致气温成为促进生长的主导因子^[44]。此外，气候变暖促使青杨生长季延长，特别是生长季末期较高的气温通过促进木质部细胞分化，增加了年际生长量^[47-48]。自 20 世纪 70 年代以来，青杨 STD 年表与 SPEI、scPDSI 均表现出逐步增强的负相关关系，其中，5—7 月 SPEI 与年轮宽度的负相关性增强，同时，生长季（5—9 月）scPDSI 自 1975 年起与青杨 STD 年表保持稳定的显著性负相关关系，凸显了青杨在生长关键期对水分过剩的敏感性。研究区降水增多或蒸散减少导致的水分过剩会限制木质部的形成和细胞发育，反映出研究区环境的湿润化对青杨树木生长具有一定的抑制作用^[16]。一般情况下，树木的生长对于气候因子响应关系是相对稳定的；然而，随区域气候快速变暖，青杨生长对气温和水分因子的响应发生了反向变化，进一步印证了川西地区气候变暖对青杨生长的主导作用。

3.3 青杨的生长释放以及抑制

本研究中，近百年来青杨生长释放时段主要集中 1937—1940、1977—1978 和 1999—2004 年间，出现了 3 次显著的生长释放事件，而在 2008—2010 年间则出现一次明显的生长抑制。在 1937—1940 年期间，青杨生长释放与四川地区气候条件的显著变化密切相关。根据《中国气象灾害大典—四川卷》^[49]的记载，1936—1937 年，川西地区的茂县、仁寿、眉山、洪雅、冕宁、西昌和会理等地高温事件频发，气温显著上升，降水量大幅减少。川西地区这种大范围持续干热的气候条件通过增加光合有效辐射和降低水分抑制为青杨的径向生长创造了有利条件。1977—1978 年，青杨生长释放的 PGC 范围为 37.7%~46.6%。滑动相关分析表明，该时期 5—6 月气温因子呈上升趋势，而降水量和相对湿度则呈下降趋势，进一步表明了气温升高和水分减少对青杨生长的促进作用。1999—2004 年，青杨生长释放的 PGC 范围为 33.4%~57.0%，其中 2002、2003 年的 PGC 值均超过 50.0%。2002 年，降水量和相对湿度分别下降到-16.4%和-9.6%的极低值，而 5—6 月的平均最高气温和平均温度呈现明显上升趋势，这种高温低湿的气候条件可以改善土壤通气性和提高树木光合作用效率，从而对青杨生长表现出显著的积极影响。树木生长释放往往与气候条件的阶段性改善密切相关，特别是在经历了持续的低温等不利气候条件后，当气温升温时树木更容易表现出生长释放^[50]。

本研究中，在 2008—2010 年间，青杨径向生长出现显著抑制。该时期气温变化率呈下降趋势，而降水量和相对湿度变化率则明显偏高。气温下降可能降低形成层活性、缩短细胞分裂周期，并削弱光合作用效率与碳同化速率，此外，高湿环境可能导致土壤过湿、通气性降低，从而抑制根系呼吸和木质部细胞的分裂与扩展，进一步限制径向生长。已有多项研究支持该机制，例如，Kostić 等^[51]发现，湿润夏栎（*Quercus robur*）林春季土壤水分与年轮宽度呈显著负相关，表明过高的土壤水分可能

导致根际缺氧,抑制木质部细胞扩展。Ye 等^[52]在塔里木河上游的研究指出,生长季高湿条件下胡杨年轮宽度显著变窄。此外,陈峰等^[53]研究表明,在湿润—半湿润地区过量降水可能导致土壤氧气供应减少,抑制根系呼吸,从而显著限制树木的径向生长。综上所述,青杨在该阶段的生长抑制很可能归因于气温降低与高湿环境的共同作用。

4 结论

本研究利用川西高原九寨沟地区的青杨树轮样本,建立了研究区 1863—2022 年的树轮宽度标准化年表,揭示了该地区青杨树木生长特征,并探讨了其与气候因子的响应关系。树轮宽度与气候因子的相关分析表明,研究区 5—6 月气温和水分条件共同影响青杨的径向生长。近百年研究区青杨共发生 3 次生长释放事件(1937—1940、1977—1978 和 1999—2004 年)和 1 次生长抑制事件(2008—2010 年)。滑动相关分析表明,从 20 世纪 70 时代开始,气温逐渐成为关键的气候影响因子,表明生长季高温低湿的气候条件有利于青杨生长,在未来川西地区持续暖干化趋势下,川西地区青杨可能会进一步加速生长。本研究揭示了川西地区阔叶树种青杨树轮宽度与气候因子之间的响应关系,丰富了川西地区阔叶树种的树木年代学和树轮生态学研究,为评估该区树木生长适应未来气候变化能力提供了科学依据。未来仍需对川西地区更多阔叶树种的生长进行研究,以提高对其他阔叶树种树木生长与气候响应关系的认知。

责任编辑 孙 菊

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023
- [2] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1503-1509
- [3] 次央, 次仁旺姆, 德吉, 等. 1961—2015 年青藏高原极端气温事件的气候变化特征. 高原山地气象研究, 2021, 41(2): 108-114
- [4] Jiang M, Medlyn BE, Drake JE, et al. The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment. Nature, 2020, 580: 227-231
- [5] Domke GM, Oswalt SN, Walters BF, et al. Tree planting has the potential to increase carbon sequestration capacity of forests in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117: 24649-24651
- [6] Harris NL, Gibbs DA, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change, 2021, 11: 234-240
- [7] Brehm N, Bayliss A, Christl M, et al. Eleven-year solar cycles over the last millennium revealed by radiocarbon in tree rings. Nature Geoscience, 2021, 14: 10-15
- [8] Björklund J, Seftigen K, Stoffel M, et al. Fennoscandian tree-ring anatomy shows a warmer modern than medieval climate. Nature, 2023, 620: 97-103
- [9] Cabon A, Deroose RJ, Shaw JD, et al. Declining tree growth resilience mediates subsequent forest mortality in the US Mountain West. Global Change Biology, 2023, 29: 4826-4841
- [10] 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. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1205-1213
- [11] 袁超峰, 王文志, 吴喆虹, 等. 健康与衰退樟子松和杨树径向生长响应气候及其生态弹性差异. 应用生态学报, 2025, 36(2): 411-417
- [12] 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
- [13] 李静茹, 彭剑峰, 杨柳, 等. 川西高原两种针叶树径向生长对气候因子的响应. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3512-3520
- [14] 彭钟通, 郭明明, 张远东, 等. 升温突变对川西道孚林线川西云杉和鳞皮冷杉生长的影响. 生态学报, 2021, 41(20): 8202-8211
- [15] 袁晴雪, 喻树龙, 姜盛夏, 等. 川西雅江地区过去 567 年 3—8 月干旱变化的树轮重建. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3627-3635
- [16] 张萌, 石松林, 石春明, 等. 川西高原 4 种典型针叶树径向生长对气候因子的响应. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1947-1957
- [17] Zhao S, Pederson N, D'orangeville L, et al. The International Tree-Ring Data Bank (ITRDB) revisited: Data availability and global ecological representativity. Journal of Biogeography, 2019, 46: 355-368
- [18] 李腾, 何兴元, 陈振举. 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应——以千山为例. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1841-1848
- [19] 贺敏, 魏江生, 石亮, 等. 大兴安岭南段山杨径向生长和死亡对区域气候变化的响应. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3237-3244
- [20] 杨银科, 王文科, 杨泽元. 胡杨径向生长与气候环境响应分析. 科技导报, 2012, 30(16): 52-58
- [21] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 近 40 年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2020, 40(24): 9108-9119
- [22] Edmondson J, Friedman J, Meko D, et al. Dendroclimatic potential of plains cottonwood (*Populus deltoides* subsp. *monilifera*) from the Northern Great Plains, USA. Tree-Ring Research, 2014, 70: 21-30
- [23] Peng Y, Chen K. Phylogeographic pattern of *Populus cathayana* in the southeast of Qinghai-Tibetan Plateau of China revealed by cpSSR

- markers. *Silva Fennica*, 2011, 45: 583-594
- [24] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 92-96
- [25] Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78
- [26] 方克艳, 杨保, 郑怀舟, 等. 树轮学研究方法及其在全球变化中的应用. *第四纪研究*, 2015, 35(5): 1283-1293
- [27] Bunn AG. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, 26: 115-124
- [28] Zang C, Biondi F. Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, 38: 431-436
- [29] Wang Z, Wang W, Huang JG, et al. An improved assessment of forest disturbance using a novel approach of combining a gaussian mixture model with an EM algorithm. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112564
- [30] 张昕宇, 高露双, 刘可祥, 等. 新疆天山西部伊犁河流域不同海拔雪岭云杉生长衰退特征. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1196-1204
- [31] Wigley TM, Briffa KR, Jones PD. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23: 201-213
- [32] Black BA, Abrams MD. Development and application of boundary-line release criteria. *Dendrochronologia*, 2004, 22: 31-42
- [33] Kang J, Yang Z, Yu B, et al. An earlier start of growing season can affect tree radial growth through regulating cumulative growth rate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 342, DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109738
- [34] 高露双, 赵秀海, 王晓明. 长白山火烧红松年表特征分析. *林业科学*, 2011, 47(3): 189-193
- [35] 郭滨德, 王晓春, 张远东. 阈值温度和积温对川西高原林线岷江冷杉径向生长的影响. *生态学报*, 2019, 39(3): 895-904
- [36] 李颖辉, 齐贵增, 冯荣荣, 等. 秦岭北麓油松径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2043-2050
- [37] 邱杨, 王兆鹏, 张冬有, 等. 大兴安岭北部不同树种径向生长对气温突变的响应. *应用生态学报*, 2024, 35(11): 2933-2941
- [38] 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. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1045-1057
- [39] 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. *生态学报*, 2015, 35(22): 7464-7474
- [40] Ren P, Rossi S, Camarero JJ, et al. Critical temperature and precipitation thresholds for the onset of xylogenesis of *Juniperus przewalskii* in a semi-arid area of the north-eastern Tibetan Plateau. *Annals of Botany*, 2018, 121: 617-624
- [41] 王兵, 高鹏, 郭浩, 等. 江西大岗山林区樟树年轮对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 71-76
- [42] 薛盼盼, 缪宁, 岳喜明, 等. 青藏高原东缘岷江冷杉径向生长对升温响应分异的坡向和海拔差异. *林业科学*, 2023, 59(7): 65-77
- [43] 任旭明, 宫渊奇, 王平安, 等. 区域气温和降水对关帝山不同海拔华北落叶松径向生长的耦合效应. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1548-1557
- [44] Yang J, Zhao B, Zheng J, et al. Linkage between spruce forest decline and cloud cover increase in the Qilian Mountains of the northeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 2023, 37: 1097-1106
- [45] Liang H, Lyu L, Wahab M. A 382-year reconstruction of August mean minimum temperature from tree-ring maximum latewood density on the southeastern Tibetan Plateau, China. *Dendrochronologia*, 2016, 37: 1-8
- [46] Williams AP, Still CJ, Fischer DT, et al. The influence of summertime fog and overcast clouds on the growth of a coastal Californian pine: A tree-ring study. *Oecologia*, 2008, 156: 601-611
- [47] Larysch E, Stangler DF, Nazari M, et al. Xylem phenology and growth response of European beech, silver fir and Scots pine along an elevational gradient during the extreme drought year 2018. *Forests*, 2021, 12: 75. DOI:10.3390/f12010075
- [48] 齐艳莹, 买尔当·克依木, 李宗善, 等. 策勒沙漠绿洲过渡带胡杨径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2024, 35(5): 1187-1195
- [49] 詹兆渝. 中国气象灾害大典四川卷. 北京: 气象出版社, 2006: 238-239
- [50] 王晓春, 赵玉芳. 黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释. *生态学报*, 2011, 31(5): 1230-1239
- [51] Kostić S, Wagner W, Orlović S, et al. Different tree-ring width sensitivities to satellite-based soil moisture from dry, moderate and wet pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands across a southeastern distribution margin. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149536
- [52] Ye Y, Liu Y, Li Q, et al. A 195-year growing season relative humidity reconstruction using tree-ring cellulose $\delta^{13}\text{C}$ in the upper Tarim River Basin, NW China. *Forests*, 2023, 14: 682
- [53] 陈峰, 王世杰, 赵晓恩, 等. 20世纪以来中国北方干旱半干旱区针叶树种径向生长动态变化. *地理学报*, 2024, 79(9): 2341-2355