

DOI: 10.20103/j.stxb.202310262330

李佳欣, 刘娅萌, 彭剑峰, 吕润生, 何仲夏, 李金宽, 彭猛, 韦晓旭, 张珂榆, 侯德乐. 伏牛山高海拔华山松径向生长对气候变化响应的稳定性评估. 生态学报, 2025, 45(1): 157-167.

Li J X, Liu Y M, Peng J F, Lü R S, He Z X, Li J K, Peng M, Wei X X, Zhang K Y, Hou D L. Stability assessment of response of *Pinus armandii* Franch. radial growth to climate change at high altitude in Funiu Mountains, Central China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 157-167.

伏牛山高海拔华山松径向生长对气候变化响应的稳定性评估

李佳欣¹, 刘娅萌¹, 彭剑峰^{1,2,*}, 吕润生³, 何仲夏⁴, 李金宽¹, 彭 猛¹, 韦晓旭¹, 张珂榆¹, 侯德乐¹

1 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

2 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 开封 475004

3 嵩县林业局, 洛阳 471400

4 国有嵩县五马寺林场, 洛阳 471400

摘要: 气候变化将影响全球森林生态系统的动态, 其中早材和晚材的形成直接受季节性气候因子的影响。为厘清全球暖干化背景下华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 径向生长对气候响应的稳定性, 以河南伏牛山高海拔地区华山松的早材、晚材和全轮的年轮宽度为研究对象。建立了华山松早材、晚材和全轮的标准年表, 利用标准年表与各气候因子做相关分析和滑动相关分析。结果表明: 1) 早材与全轮年表的相关性更好, 可能包含更多相似气候信息, 并且早材对气候的敏感性比晚材更显著; 2) 不同的季节温度、降水量变化影响早材、晚材年轮的形成与生长。该区域华山松径向生长主要受到前一年生长季 (6—8 月) 水热组合的影响。早材径向生长还与当年 2 月温度有关, 晚材还受当年生长季后期 (8、9 月) 水热组合的影响; 3) 建立了华山松早材、晚材和全轮生长模型, 确定了前一年 8 月温度是早材和全轮的主要限制因子, 而当年 9 月降水是晚材生长的主要限制因子, 生长模型结果与相关分析结果较为一致; 4) 早材、晚材和全轮均对前一年生长季 (6—8 月) 温度的负响应和相对湿度的正响应呈减弱趋势, 即出现了气候“分异现象”。此外, 早材对 2 月温度的正响应增强, 晚材对 9—10 月降水的负响应增强。因此, 随着全球暖干化趋势增强, 尤其是夏季的暖干化更有利于伏牛山高海拔华山松径向生长, 这一研究结果也可以为伏牛山地区的森林管理和经济发展提供了科学依据。

关键词: 伏牛山; 华山松; 早材; 晚材; 升温; 气候响应; 稳定性

Stability assessment of response of *Pinus armandii* Franch. radial growth to climate change at high altitude in Funiu Mountains, Central China

LI Jiixin¹, LIU Yameng¹, PENG Jianfeng^{1,2,*}, LÜ Runsheng³, HE Zhongxia⁴, LI Jinkuan¹, PENG Meng¹, WEI Xiaoxu¹, ZHANG Keyu¹, HOU Dele¹

1 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Henan Province Key Laboratory of Earth System Observation and Simulation, Kaifeng 475004, China

3 Forestry Bureau of Songxian County, Luoyang 471400, China

4 State owned Wumasi Forest Farm in Song County, Luoyang 471400, China

Abstract: Climate change will impact the dynamics of global forest ecosystems, in which the formation of earlywood and latewood is directly influenced by seasonal climatic factors. In order to clarify the stability of response of *Pinus armandii*

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077417, 41671042)

收稿日期: 2023-10-26; **网络出版日期:** 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jfpeng@vip.henu.edu.cn

Franch. radial growth to climate under the background of global warming and drying, this study focuses on the earlywood width (EWW), latewood width (LWW), and tree-ring width (TRW) of *P. armandii* at high altitudes in the Funiu Mountains of Henan Province. Standard chronologies for EWW, LWW and TRW of *P. armandii* are developed, and correlation analysis and smoothing correlation analysis are conducted between the standard chronologies and various climate factors. The findings reveal the following: 1) The study reveals a stronger correlation between EWW and TRW, which may contain more similar climatic information, and the EWW exhibits a more significant sensitivity to climatic changes to the LWW. 2) Different seasonal changes in temperature and precipitation affect the formation and growth of tree rings in EWW and LWW. The radial growth of *P. armandii* in this region is predominantly influenced by the hydrothermal combination during the prior growing season (June–August). Specifically, the radial growth of EWW is also related to the temperature in February of the current year, while the LWW is also affected by the hydrothermal combination in the later part of the growing season (August and September) of the same year. 3) We establish growth models for the EWW, LWW and TRW of *P. armandii*. It is determined that the temperature in August of the previous year is the main limiting factor for the EWW and TRW, while the precipitation in September of the current year is the main limiting factor for the growth of the LWW. The results of the growth models are relatively consistent with the results of the correlation analysis; 4) EWW, LWW and TRW are negative response to the previous year's growing season (June–August) temperature and relative humidity positive response is weakened. This phenomenon is a climatic “phenomenon of differentiation”. In addition, the positive response of EWW to February temperatures is intensified, while the LWW shows an intensified negative response to precipitation levels in September and October. Consequently, as the global trend of warming and drying intensifies, especially the warming and drying in summer is more conducive to radial growth of *P. armandii* at higher altitude, this research result can also provide scientific basis for forest management and economic development in Funiu Mountains.

Key Words: Funiu Mountains; *Pinus armandii* Franch.; earlywood; latewood; warming; climate response; stability

IPCC 第六次评估报告显示,自 19 世纪中叶以来,全球地表平均温度已上升约 1°C,并预计持续上升^[1]。全球变暖会对森林生态系统的组成、结构和动态产生显著影响^[2–3],全球变暖加剧了干旱胁迫,可能导致树木衰退甚至死亡,进而降低森林的整体生产力^[4–5];相对地,在高海拔和高纬度地区,全球气候变暖可能对树木径向生长产生促进作用^[6–7]。树木年轮学,作为一门历经百年发展的学科,已在全球变化研究和生态学领域取得显著成就,并以其定年准确、分辨率高和连续性强等特点被广泛应用于全球气候变化的研究中^[8]。中国树木年轮学研究起步相对较晚,早期的研究主要集中在青藏高原区^[9–12]和西北干旱地区^[8, 13–15]。近年来,国内的研究区域已经显著扩展,涵盖了东北^[16–17]、华北^[18–19]和东南部^[20–21]等地区;此外,研究手段和方法也不断创新,包括树轮同位素^[22–23]、早材、晚材^[24–29]和木材密度^[30–31]等方面,研究方向也呈现出多元化。相较于树全轮,早材与晚材宽度具有更高的时间分辨率,可能会揭示树轮与气候变化之间更细节的特征^[32–33]。研究表明,分离早晚材能够提取到不同的响应气候信号,但在不同的地区早晚材的敏感度不同,如欧洲和北美树木的晚材响应比早材敏感^[25–26],而在我国大多早材的敏感度比晚材更明显^[27–29]。

伏牛山地处秦岭余脉,是我国东部季风区亚热带与暖温带过渡带,属于生态环境脆弱地带,同时也是全球气候变化的敏感区域之一^[34]。近年来,伏牛山地区的气候呈暖干化趋势,这一变化对当地及其周边的生态环境带来了新的挑战;华山松作为我国特有树种,属松科乔木,广泛分布于中部和西南地区,是伏牛山高海拔山区主要针叶林的组成树种之一^[35];关于秦岭地区华山松的研究多集中于全轮宽度指标,主要探讨了树轮宽度与气候的响应关系^[35–41]以及对气候因子重建等的研究^[18–19]。然而,针对华山松早、晚材宽度指标对气候变化研究,在伏牛山地区仅见 Zhao 等人利用龙池漫和白云山油松早材宽度年表重建了 1868–2005 年的 scPDSI 的数据^[42]。因此,对华山松树轮早材、晚材宽度指标的气候学敏感性问题的进一步深入探究有利于更好地厘清气候变化对华山松生长的影响。

本研究旨在:分析伏牛山高海拔华山松早材、晚材和全轮宽度的主要影响因子。在气候变暖的大背景下,探讨华山松早材、晚材和全轮在时间尺度上对气候因子变化响应的稳定性分析。本研究有利于深入了解伏牛山地区气候变化对生态系统的影响,为该区域进一步开展树轮早材、晚材和全轮宽度的气候重建研究提供参考。

1 数据获取和研究方法

1.1 研究区概况

龙池漫是河南省伏牛山自然保护区的核心区,位于河南省嵩县南部,南与南召县接壤(图 1),属于伏牛山山系,最高海拔 2129 m。气候属于大陆性季风气候区,多年平均温度 13.7 °C,年降水量 844 mm,雨热同期,位于北亚热带向暖温带过渡地带,龙池因海拔较高、多雨水集聚成池而得名。研究区水平区域植被在低海拔以栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)、山茱萸(*Cornus officinalis* Sieb. Et zucc.)、山合欢(*Albizia kalkora*)等为优势群落,高海拔则以华山松(*Pinus armandii* Franch.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)为主^[43],华山松主要分布在海拔 1800 m 以上区域。龙池漫林区山势陡峭,几乎无常住人口,人为干扰较少,森林群落结构发育完好,属于中原地区唯一未被开发而现存的原始森林区,是进行树木年轮研究的理想区域。

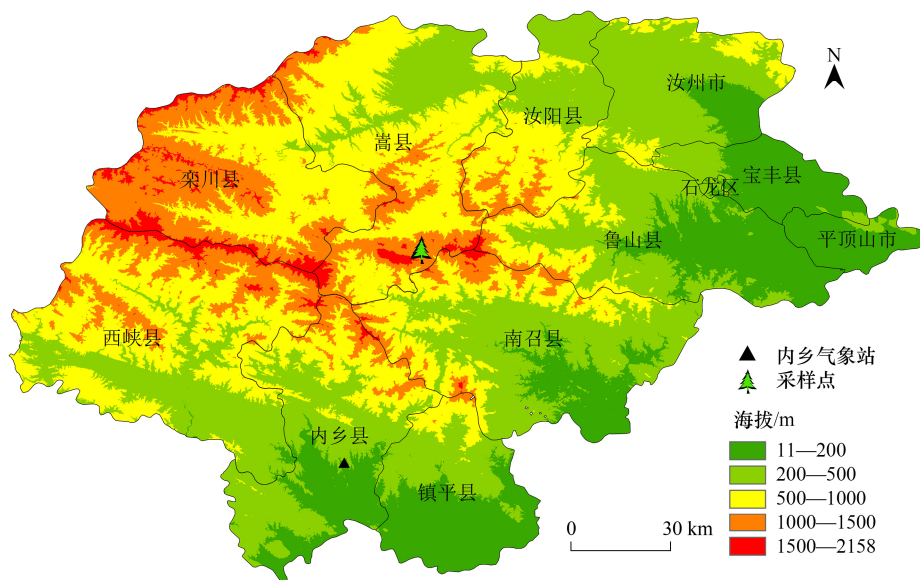


图 1 龙池漫地区采样点和附近气象站位

Fig.1 Map of sampling sites in Longchiman and meteorological stations nearby

1.2 年表建立

2022 年 7 月在河南省伏牛山自然保护区核心区的龙池漫顶附近(33°42'12"N, 112°0'53"E, 海拔 1960—2040 m)的华山松林作为采样点,按照国际树木年轮数据库的要求进行采样,选取华山松胸径较大、受人为影响较小且生长环境较稳定的健康华山松,每树采集树芯 1—2 个,共采集 50 株树 97 根样芯,分别装入塑管并标注采样信息。

样本带回实验室后,按照国际树木年轮数据库的标准,对样芯进行晾干、固定、打磨处理,直至显微镜下可清晰看见细胞为止。树木样芯的早材、晚材界限明显,其中早材是树轮中颜色较浅、低密度的部分,晚材是紧挨着早材颜色较深的部分,将早晚材过渡的一半作为两者分界线^[44]。在显微镜下根据早晚材的区分标准进行目视交叉定年和宽度测量,测量后的序列用 COFFCHA 程序^[45]对定年结果进行质量控制,剔除一些年轮异常、腐芯或测量困难的样芯,对年轮宽度序列与主序列相关系数达不到 95% 置信区间的树芯样本予以适当的

修正或者剔除,最终选择 49 棵树的 88 根样芯建立年表。通过 ARSTAN 程序^[46]中的线性函数或负指数函数拟合对原始树轮宽度指数去除树木生理趋势及标准化,最终建立华山松树木早材宽度(EWW)、晚材宽度(LWW)和全轮宽度(TRW)的标准年表(STD)差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。本文选择年表特征值及与气候因子相关较好的标准年表(STD)进行研究。根据子样本信号强度 $SSS > 0.85$ ^[47]确定全轮年表可靠时段为 1967—2021 年(图 2)。

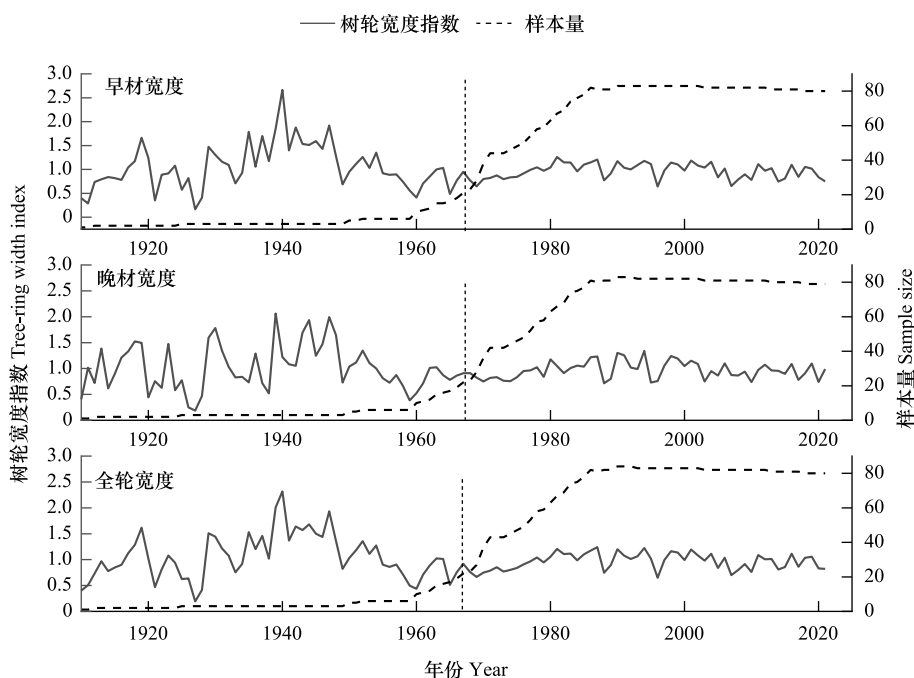


图 2 早材、晚材和全轮宽度标准年表(STD)及样本量(竖线为 $SSS > 0.85$ 的年份)

Fig.2 Standard chronology (STD) and sample sizes for earlywood, latewood and tree-ring width (vertical line for years with $SSS > 0.85$)

EWW:早材宽度 earlywood width; LWW:晚材宽度 latewood width; TRW:全轮宽度 tree ring width; SSS:子样本信号强度 Subsample Signal Strength

1.3 气象数据

选取采样点附近的内乡气象站($33^{\circ}1'48''N, 111^{\circ}31'12''E, 160\text{ m}$) (数据来自中国气象数据共享服务系统 (<https://data.cma.cn>)) 1967—2018 年的月均温、月降水量和月相对湿度,3 个气象因子指标作为分析对象(图 3)。内乡气象站因其与采样点的近距离和气候因子与树轮指数的高相关性,最终被选取。从气象站过去 52 年(1967—2018 年)的气象数据变化趋势(图 3)可知,平均温度增加趋势明显($P < 0.05$),每 10 年大约上升 0.17°C ,而降水和相对湿度整体呈下降趋势,但并不显著($P > 0.05$),所以伏牛山地区的气候变化存在暖干化趋势。

1.4 研究方法

利用树木年轮学的专业软件 Dendroclim 2002^[48]对华山松树轮宽度年表与气候因子进行相关分析,相关分析时段选取前一年 3 月至当年 11 月,包含前一年和当年的生长季。以 30 年为滑动窗口,1 年为滑动步长,进行树轮年表和气候要素的滑动相关分析。采用 SPSS 软件利用逐步回归分析建立伏牛山地区的华山松生长模型。

2 结果与分析

2.1 树轮宽度年表统计特征值

华山松早材、晚材和全轮的宽度年表的各项统计参数差异较小(表 1),平均敏感度均较高(0.256, 0.268, 0.223),均高于 0.2,这表明该地区华山松对外界环境变化较敏感。信噪比也均较高(14.507, 15.785, 15.765),

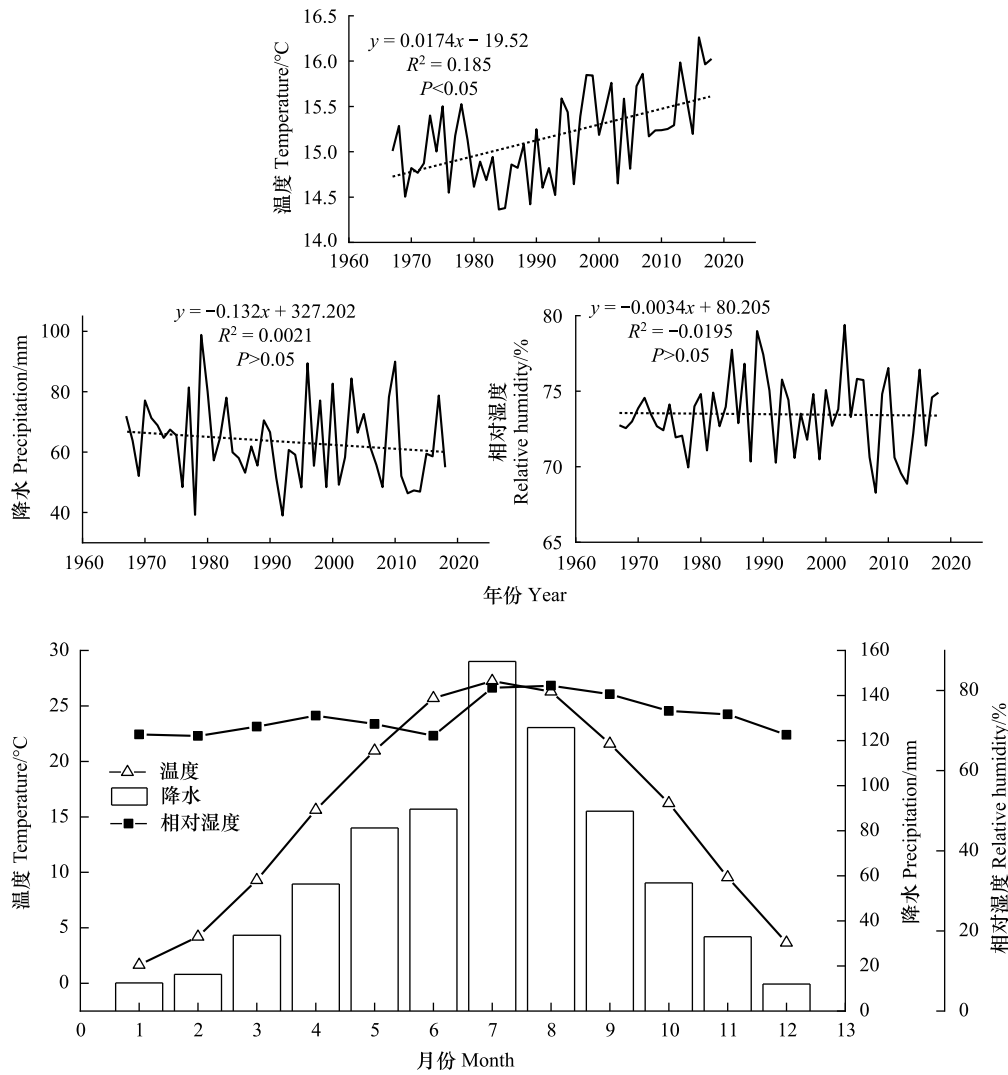


图 3 研究区 1967—2018 年气象要素变化特征

Fig.3 Characteristics of Climate factors in the study area from 1967—2018

表 1 树轮宽度标准年表的统计特征

Table 1 Statistics of tree-ring width standard chronology (STD)

| 特征 Characteristics | EWW | LWW | TRW |
|---|--------|-----------|--------|
| 年表样本量(树/样芯) Samples in chronology (core/tree) | 49/88 | 49/88 | 49/88 |
| 平均敏感度 Mean sensitivity (M.S.) | 0.256 | 0.268 | 0.223 |
| 标准差 Standard deviation (S.D.) | 0.355 | 0.334 | 0.330 |
| 公共区间(年) Common period (year) | | 1986—2021 | |
| 所有样芯间相关系数 All series correlation (R_1) | 0.159 | 0.172 | 0.170 |
| 树内相关系数 Correlation within trees (R_2) | 0.382 | 0.381 | 0.476 |
| 树间相关系数 Correlation between trees (R_3) | 0.156 | 0.170 | 0.167 |
| 信噪比 Signal-noise ratio (SNR) | 14.507 | 15.785 | 15.765 |
| 样本总解释量 Expressed population signal (EPS) | 0.936 | 0.940 | 0.940 |

EWW:早材宽度 earlywood width;LWW:晚材宽度 latewood width;TRW:全轮宽度 tree ring width

这表明三个年表均含有较多的环境信息。样本总解释量均达到一个较高的值,分别是 0.936、0.94、0.94,能较好的代表该地区的总体特征。此外,由于该区域较温暖湿润,导致树木个体差异较显著,这表明树木生长并非

完全受相同环境要素的限制,所以样芯相关系数 R 值相对较小^[20]。

由表 2 可知,华山松的早材与全轮的相关性比晚材与全轮的更高,这表明早材与全轮之间可能包含了更多相似的气候信息。

表 2 早材、晚材和全轮宽度序列之间的相关性

Table 2 Correlation between earlywood, latewood and tree-ring width

| 相关性 Correlation | TRW | EWW | LWW |
|-----------------|-----|----------|----------|
| TRW | 1 | 0.971 ** | 0.764 ** |
| EWW | | 1 | 0.600 ** |
| LWW | | | 1 |

** : $P < 0.01$

2.2 华山松径向生长对气候因子的响应

由图 4 可知, EWW、LWW 和 TRW 与前一年 6—8 月组合月份的温度、降水和相对湿度的相关性呈显著相关, 仅有 LWW 与降水不显著相关。华山松早材、晚材和全轮宽度年表与前一年温度基本呈负相关关系, 与前一年夏季(6、7、8 月) 温度呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 但 LWW 与前一年 6 月温度并不显著。 EWW 和 TRW 与当年 2 月温度呈显著正相关关系。 LWW 与当年 9 月温度呈显著正相关, 为 0.26 ($P < 0.05$); 根据图 4 中, 降水和相对湿度与年表的相关性可知, 华山松年表对相对湿度的响应比降水的更明显, EWW、LWW 和 TRW 与前一年 8 月降水显著正相关, 与当年 7、9 月降水显著负相关, 仅有 EWW 与当年 7 月降水不显著。与相对湿度的相关性中, EWW 与前一年 3、6、8 月和当年 9 月相对湿度呈显著相关关系。 LWW 与前一年 7、8 月显著正相关 ($P < 0.05$), 分别是 0.27 和 0.36。与当年 9、10 月相对湿度显著负相关 ($P < 0.05$), 分别是 -0.49 和 -0.32。 TRW 与前一年 6、7、8 月相对湿度呈显著正相关, 与当年 9、10 月的相对湿度呈显著负相关关系。

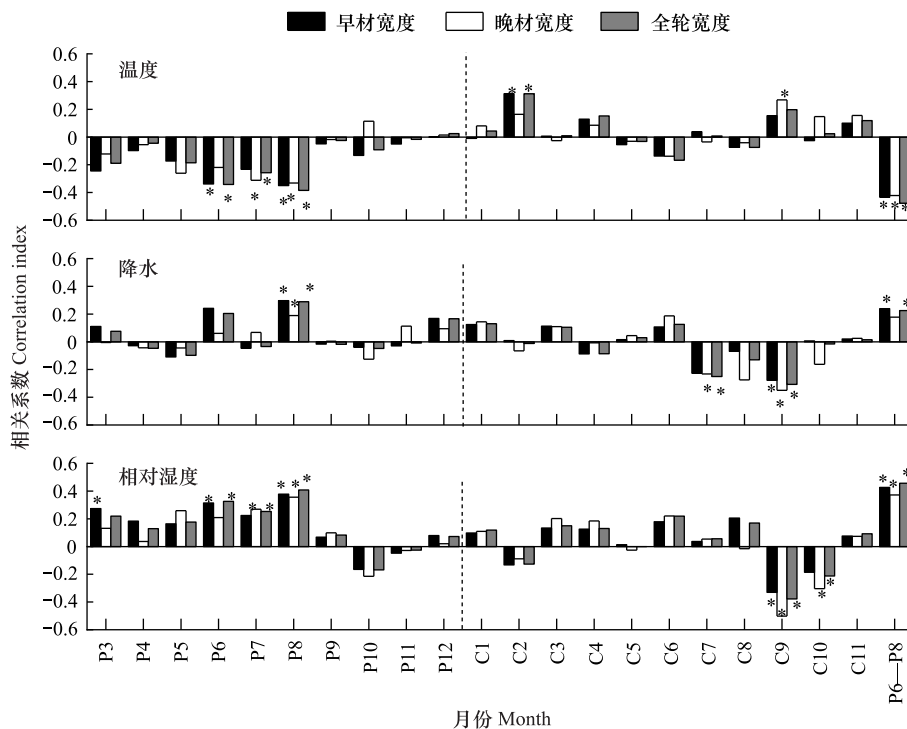


图 4 树轮早材、晚材和全轮宽度年表与各气候因子的相关关系(1967—2018 年)

Fig.4 Correlation between EWW, LWW and TRW chronologies of tree ring and climate factors(1967—2018)

*: $P < 0.05$; P: 上一年; C: 当年

2.3 建立区域回归模型

为深入探讨龙池漫华山松径向生长对气候变化的响应,本研究采用逐步回归分析法,对 1967—2018 年龙池漫区域早材、晚材和全轮的标准年表指数 (W_E 、 W_L 、 W_R) 进行分析,建立一元或多元回归模型。设定若自变量 F 进入回归模型的显著水平阈值为 0.05 对华山松前一年 3 月到当年 11 月的月温度和月降水数据进行逐步回归分析。通过逐步剔除不显著的变量,保留对华山松生长具有主要限制作用的气候因子。最后确定华山松生长模型与主要限制因子的定量关系,其线性回归方程如下:

$$W_E = 2.803 + 0.026 \times T_{c2} - 0.036 \times T_{p8} - 0.039 \times T_{p6} \quad (1)$$

$$(R=0.521, R^2 = 0.271, R_{adj}^2 = 0.226, F=4.080)$$

$$W_E = 2.183 - 0.046 \times T_{p8} \quad (2)$$

$$(R=0.352, R^2 = 0.124, R_{adj}^2 = 0.107, F=7.087)$$

式中, W_E 为早材年轮宽度指数; T_{c2} 、 T_{p8} 和 T_{p6} 分别代表当前 2 月的温度、前一年 8 月温度和前一年 6 月的温度。 R 为相关系数, R^2 为方差解释量, R_{adj}^2 为调整后的 R^2 , F 为方差检验。

早材与气候因子的逐步回归得到两种结果:(1)是由当年 2 月、前一年 6、8 月温度作为树木生长的主要影响因子的多元生长模型;(2)是由前一年 8 月温度作为树木生长的主要限制因子的一元回归生长模型。方程中 F 为正值,说明模型是有效的,验证了前一年 8 月份温度对早材有限制作用且具有一定的滞后影响。

$$W_L = 3.174 - 0.001 \times P_{c9} - 0.032 \times T_{p8} - 0.001 \times P_{c8} - 0.044 \times T_{p7} \quad (3)$$

$$(R=0.575, R^2 = 0.331, R_{adj}^2 = 0.274, F=4.168)$$

$$W_L = 1.060 - 0.001 \times P_{c9} \quad (4)$$

$$(R=0.345, R^2 = 0.119, R_{adj}^2 = 0.101, F=6.757)$$

式中, W_L 为晚材年轮宽度指数; P_{c8} 、 P_{c9} 和 T_{p7} 、 T_{p8} 分别代表当年 8、9 月的降水和前一年 7、8 月温度。

晚材与气候因子的逐步回归结果是:式(3)是由当年 8、9 月降水和前一年 7、8 月温度作为树木生长的主要影响因子的多元生长模型;式(4)是关于前一年 9 月降水为主要影响因子的一元回归生长模型。

$$W_R = 2.132 - 0.049 \times T_{p8} + 0.027 \times T_{c2} \quad (5)$$

$$(R=0.483, R^2 = 0.233, R_{adj}^2 = 0.202, F=8.809)$$

$$W_R = 2.295 - 0.05 \times T_{p8} \quad (6)$$

$$(R=0.387, R^2 = 0.150, R_{adj}^2 = 0.133, F=5.332)$$

式中, W_R 为全轮宽度指数; T_{p8} 为前一年 8 月温度; T_{c2} 为当年 2 月温度;逐步回归结果表明,前一年 8 月温度是影响华山松全轮生长的主要限制因子,当年 2 月温度对树木生长也具有显著影响。

依据上述建立的回归方程,进一步确定了该区域华山松的早材、晚材和全轮径向生长的主要限制因子,早材和全轮径向生长主要受到前一年 8 月温度的影响,而晚材径向生长的主要受到是当年 9 月的降水的影响,这与前文中相关分析的结果高度一致。

2.4 华山松早材、晚材和全轮径向生长与主要气候因子的稳定性分析

选取滑动窗口为 30 年的区间对早材、晚材和全轮年表与气候因子的动态关系进行分析(图 5)。随着气候变暖,华山松的生长对温度的响应表现出先减弱后增强的趋势,其中晚材的响应尤为明显。在降水响应方面,晚材和全轮的表现更为显著。晚材和全轮与相对湿度的相关性是从显著正相关到变为显著负相关,且其响应强度有所增强。此外,早材、晚材和全轮在同一时段对温度、降水和相对湿度的响应是有差异的。

EWW、LWW 和 TRW 与前一年 6、7、8 月温度的滑动相关由显著负相关转变为不显著相关,并且负响应趋势减弱。而对当年 6、7、8 月温度的相关性则由显著负相关逐渐变为正相关。而 EWW 和 TRW 与当年 2 月温度的滑动相关,在近年随着温度升高正响应增加;EWW、LWW 和 TRW 与前一年 6、7、8 月相对湿度的正响应逐渐减弱,与同期温度的相关性恰好相反;EWW、LWW 和 TRW 对降水的响应总体上呈波动性(图 5),其中当

年 8、9 月的降水与年表的相关性出现了显著变化,从正相关转变为负相关,并在近年趋势加强,尤其在晚材中更为明显。

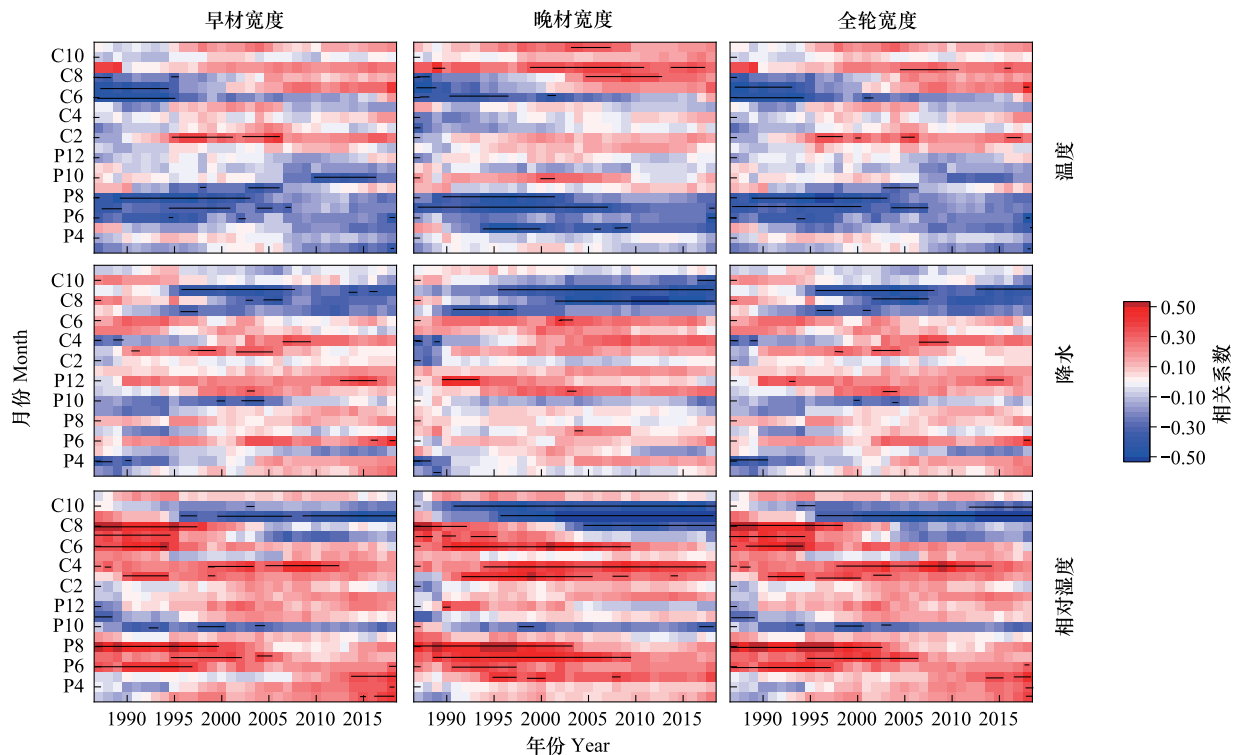


图 5 树轮早材、晚材及全轮宽度年表分别与各气候因子的滑动相关分析(1967—2018)

Fig.5 Smoothing correlation analysis of EWW, LWW and TRW chronology of tree ring and climate factors(1967—2018)

3 讨论

3.1 树轮-气候响应分析

伏牛山地区位于中国南北过渡带,属于大陆性季风气候。该地区降水主要集中在 7、8 月,大量原始森林存在于 1800m 以上的高海拔区域,还形成了独特的湿润森林小气候。由图 4 可知,华山松 EWW、LWW 和 TRW 主要受到前一年夏季(6、7、8 月)温度和相对湿度的影响,有明显的滞后效应。6—8 月是华山松径向生长旺盛期,此时过高的温度会加剧树木蒸腾作用和土壤水分蒸发,导致干旱或植物的生理性缺水,进而影响光合作用酶的活性,引发高温限制,不利于当年树木甚至下年树木径向生长^[35],这与嵩山地区油松的研究结果相似^[49]。然而相对湿度的增加可以有效缓解树木生长的高温抑制现象,有利于叶片气孔打开,促进树木径向生长^[50]。但 7 月是该区域降水最丰富的一个月,该区域龙池垵山顶有一处天然的水池“龙池”,所以当年树木生长的同时,水分的增加可能会使该区域树木生长水分过量,干扰植物根系有氧呼吸,增强根系腐烂的风险^[49];8 月水分的增加有利于缓解树木高温抑制作用,有利于叶片气孔打开,促进树木径向生长。而当年 9 月温度已经开始降低,9 月相对湿度和降水的增加可能使得温度下降,从而会导致树木生长受到抑制。

相比于晚材的生长,早材径向生长对气候因子的变化比较敏感。华山松早材生长一般在春季和夏初,春季温度的升高对树木的萌发具有积极作用,特别是当年 2 月较高的温度有利于华山松早材的萌发,使得形成层提前开始活动从而延长生长季。而 3 月随着气温的回升,高海拔地区较高的相对湿度为树木生长提供了适宜的生长条件^[38]。但对于晚材来说,生长季末期(9—10 月)的水热组合对其影响较大,9—10 月温度的升高有利于延长生长季,但水分和相对湿度的增加可能会导致温度下降,使得已基本完成干物质的积累的华山松,

由于过多的水分导致根系腐烂^[49];

龙池漫华山松早材、晚材和全轮径向生长与气候因子的响应存在差异,并且滞后效应明显。华山松生长主要受到上年生长季(6—8月)水热组合的影响,EWW与生长季前期(2月)温度有关,而LWW与生长季末期(9月)水热组合相关。多元回归分析结果进一步验证了龙池漫地区华山松早材和全轮径向生长主要受到前一年8月水热组合的限制,而晚材主要受当年9月水热组合影响较大。这些发现与庐山日本柳杉^[27]和桐柏山的黄山松^[29]等关于早晚材径向生长响应的研究结果相似。

3.2 华山松径向生长的稳定性分析

由图3可知,在过去52年(1967—2018年)内,伏牛山地区的年平均温度每10年大约上升0.17℃,表现出明显的变暖趋势,这种持续的变暖趋势很可能成为制约该地区树木生长的主要限制因素。

通过对华山松早材、晚材和全轮年表与气候因子的相关性发现,EWW、LWW和TRW与前一年生长季中期(6、7、8月)温度的负响应呈现出先增强后减弱的趋势,对相对湿度的正相关性则由显著正相关不断减弱的趋势。这可能是由于气候暖干化导致树木生长季温度对华山松的限制作用先增强后减弱造成的,昼夜温差减小^[1]会对树木的生长产生一定的影响^[51]。夜间温度升高会增加有机物的消耗,进而抑制树木生长。但是随着昼夜温差继续减小,夜间温度达到树木生长的临界阈值,此时酶活性下降,呼吸作用减缓,营养物质的消耗减少,抑制作用相应减弱^[52]。

由图5可知,EWW和TRW与当年2月温度的滑动相关随着温度升高正响应增强。一般而言,伏牛山地区生长季前期(冬季2月份)温度偏低,低温可能导致针叶树的细胞内原生质脱水,加剧土壤冻结,可能抑制早材的生长^[14]。但降水的不足会导致树木早材生长受到限制。温度的升高可能进一步促进植被的芽生长^[49],增强树木体内营养物质的输送,保证代谢活动正常,从而有利于早材径向生长^[21],因此当年2月温度的增加有利于华山松早材和全轮的生长;EWW、LWW和TRW与降水响应的趋势基本一致,但LWW与当年生长季末期(9、10月)的温度正响应增强,与相对湿度的负响应增强。9、10月是华山松晚材生长的主要时期,此时温度开始降低,而升温可能对晚材生长有一定的促进作用。然而,降水和相对湿度增加可能会间接导致区域温度下降,促使晚材提前结束生长季,甚至还会影响下一年树木生长^[40]。

4 结论

在伏牛山龙池漫高海拔地区建立华山松早材、晚材和全轮年表,平均敏感度(M.S.)、信噪比(SNR)和样本总解释量(EPS)均较高,说明华山松早材、晚材和全轮中包含较多气候信息,且早材和全轮年表更相似,比晚材对气候响应的敏感性更强。由相关分析可知,华山松径向生长对气候因子响应的滞后效应明显,其生长主要受到前一年生长季(6、7、8月)水热组合的影响;早材还受到当年2月温度的影响,当年9—10月的水热组合对晚材的影响也较明显。逐步回归生长模型通过建立3个年表的生长模型,确定了华山松早、晚材和全轮年表的主要限制因子,并且发现生长模型与相关性分析中的结果高度一致。

在全球变暖的大背景下,气温升高可能会对树木年轮的早材、晚材和全轮的径向生长产生显著影响。研究表明,龙池漫华山松早材、晚材和全轮年表与前一年生长季中期(6—8月)温度的滑动相关呈负相关,而与相对湿度的滑动呈正相关,且随着时间逐渐减弱,产生了“分异现象”。此外,2月温度的升高对早材的生长有促进作用,而暖干化对9—10月晚材生长有促进作用。若未来暖干化趋势增强,可能对伏牛山高海拔龙池漫华山松的径向生长会产生积极影响。

参考文献(References):

- [1] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [2] Lenoir J, Gégout J C, Marquet P A, de Ruffray P, Brisse H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. Science, 2008, 320(5884): 1768-1771.

- [3] Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, Seidl R, Delzon S, Corona P, Kolström M, Lexer M J, Marchetti M. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 698-709.
- [4] Liu H Y, Park Williams A, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [5] Liang E Y, Leuschner C, Dulamsuren C, Wagner B, Hauck M. Global warming-related tree growth decline and mortality on the north-eastern Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2016, 134(1): 163-176.
- [6] Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, Kipfmüller K F. Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(48): 20348-20353.
- [7] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Ted Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [8] 邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 梁尔源, 方修琦, 王丽丽. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(2): 145-153.
- [9] 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 邵雪梅. 利用树轮宽度重建近 280 a 来祁连山东部地区的春季降水. *冰川冻土*, 2001, 23(3): 292-296.
- [10] 杨保. 树轮记录的小冰期以来青藏高原气候变化的时空特征. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 81-94.
- [11] 勾晓华, 杨涛, 高琳琳, 邓洋, 杨梅学, 陈发虎. 树轮记录的青藏高原东南部过去 457 年降水变化历史. *科学通报*, 2013, 58(11): 978-985.
- [12] 刘禹, 蔡秋芳, 宋慧明. 关于青藏高原 2485 年温度的季节和空间代表性问题. *第四纪研究*, 2013, 33(1): 108-114.
- [13] 蔡秋芳, 刘禹. 油松树轮记录的 1776 年以来贺兰山地区气温变化. *地理学报*, 2006, 61(9): 929-936.
- [14] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙, 尚华明, 张同文, 张瑞波, 王慧琴. 利用树轮密度重建新疆北部 5-8 月温度变化. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 43-53.
- [15] 梁尔源, 邵雪梅, 黄磊, 王丽丽. 中国中西部地区树木年轮对 20 世纪 20 年代干旱灾害的指示. *自然科学进展*, 2004, 14(4): 111-116.
- [16] 苑丹阳, 赵慧颖, 李宗善, 朱良军, 国森, 张远东, 王晓春. 伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(4): 1150-1160.
- [17] 秦进, 白红英, 李书恒, 王俊, 甘卓亭, 黄安. 太白山南北坡高山林线太白红杉对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2016, 36(17): 5333-5342.
- [18] 史江峰, 鹿化煜, 万建东, 李升峰, 聂宏善. 采用华山松树轮宽度重建秦岭东缘近百年冬半年温度. *第四纪研究*, 2009, 29(4): 831-836.
- [19] 田沁花, 周秀骥, 刘禹, 赵平. 秦岭地区多点树轮序列记录的春夏初气温变化与北半球海温关系的初步分析. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 864-872.
- [20] 李颖俊, 方克艳, 白毛伟, 曹新光, 董志鹏, 唐婉儒, 梅泽鹏. 闽东南地区马尾松古树对气候变化和虫灾的生态弹性. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3539-3547.
- [21] 岳伟鹏, 陈峰, 袁玉江, 喻树龙, 高志鸿, 赵晓恩. 气候变暖背景下云南北部大果红杉径向生长衰退及其气候驱动因子分析. *生态学报*, 2022, 42(6): 2331-2341.
- [22] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 姜春前. 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应. *生态学报*, 2014, 34(7): 1831-1840.
- [23] 秦莉, 尚华明, 张同文, 刘卫平, 张瑞波. 天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异. *生态学报*, 2021, 41(14): 5713-5724.
- [24] 顾洪亮, 王建, 商志远, 马丽娟, 张起鹏. 马尾松树轮早材、晚材年表对气候因子响应的敏感性分析. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1150-1162.
- [25] Kipfmüller K F, Montpellier E E, Trummer M L, Griffin D. Intra-annual ring width and climate response of red pine in Itasca State Park in north-central Minnesota. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022, 52(5): 870-881.
- [26] Soulé P T, Knapp P A, Maxwell J T, Mitchell T J. A comparison of the climate response of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) trees among standardized measures of earlywood, latewood, adjusted latewood, and totalwood radial growth. *Trees*, 2021, 35(3): 1065-1074.
- [27] 白天军, 刘苑秋, 温林生, 潘俊, 曹雯, 郑希玲, 邹芹, 邓文平. 庐山日本柳杉早材与晚材年轮宽度对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 2020, 42(9): 61-69.
- [28] 郭伊利, 李书恒, 王嘉川, 韩宜洁. 芦芽山华北落叶松早晚材径向生长对气候变化响应的分离效应. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1449-1463.
- [29] Peng M, Li X, Peng J F, Cui J Y, Li J R, Wei Y F, Wei X X, Li J K. Early summer temperature variation recorded by earlywood width in the northern boundary of *Pinus taiwanensis* Hayata in central China and its linkages to the Indian and Pacific Oceans. *Biology*, 2022, 11(7): 1077.
- [30] Yasue K, Funada R, Kobayashi O, Ohtani J. The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to climatic factors. *Trees*, 2000, 14(4): 223-229.

- [31] 张同文, 袁玉江, 喻树龙, 魏文寿, 尚华明, 张瑞波, 陈峰, 范子昂. 树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应. 生态学报, 2011, 31(22): 6743-6752.
- [32] Iryna K. Climatic Signal in Earlywood, Latewood and Total Ring Width of Crimean Pine (*Pinus nigra* subsp *pallasiana*) from Crimean Mountains, Ukraine. *BALTIC FORESTRY*, 2013, 19(2): 245-251.
- [33] Lebourgeois F. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(2): 155-164.
- [34] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. 地理科学进展, 2019, 38(3):305-311.
- [35] 王婷, 沈连峰, 叶永忠, 高海强, 徐萌. 伏牛山华山松径向生长对气候变化的响应. 河南科学, 2010, 28(12): 1549-1551.
- [36] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立. 地理学报, 1994, 49(2):174-181.
- [37] Sun C F, Liu Y. Climate response of tree radial growth at different timescales in the Qinling Mountains. *PLoS One*, 2016, 11(8): e0160938.
- [38] 王婷, 李聪, 张弘, 任思远, 李鹿鑫, 潘娜, 袁志良, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应. 生态学报, 2016, 36(17): 5324-5332.
- [39] Peng J F, Peng K Y, Li J B. Climate-growth response of Chinese white pine (*Pinus armandii*) at different age groups in the Baiyunshan National Nature Reserve, central China. *Dendrochronologia*, 2018, 49: 102-109.
- [40] Peng J F, Li J B, Wang T, Huo J X, Yang L. Effect of altitude on climate - growth relationships of Chinese white pine (*Pinus armandii*) in the northern Funiu Mountain, central China. *Climatic Change*, 2019, 154(1): 273-288.
- [41] Peng K Y, Peng J F, Huo J X, Yang L. Assessing the adaptability of alien (*Larix kaempferi*) and native (*Pinus armandii*) tree species at the Baiyunshan Mountain, central China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 108-116.
- [42] Zhao Y S, Shi J F, Shi S Y, Ma X Q, Zhang W J, Wang B W, Sun X G, Lu H Y, Bräuning A. Early summer hydroclimatic signals are captured well by tree-ring earlywood width in the eastern Qinling Mountains, central China. *Climate of the Past*, 2019, 15(3): 1113-1131.
- [43] 叶永忠, 杨清培, 翁梅, 范国强, 汪万森, 白林, 程石建. 伏牛山森林群落物种多样性研究 I. 群落垂直分布与物种丰富度. 河南科学, 1999, 17(S1):68-71.
- [44] Stahle D W, Cleaveland M K, Grissino-Mayer H D, Griffin R D, Fye F K, Therrell M D, Burnette D J, Meko D M, Villanueva Diaz J. Cool- and warm-season precipitation reconstructions over western new Mexico. *Journal of Climate*, 2009, 22(13): 3729-3750.
- [45] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [46] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Tucson, 1985.
- [47] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [48] Biondi F. Are climate-tree growth relationships changing in north-central Idaho, U.S.A.? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, 32(2): 111-116.
- [49] 崔佳月, 彭剑峰, 李静茹, 李轩, 彭猛, 杨柳. 嵩山地区油松人工林树轮宽度对气候因子的响应. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3497-3504.
- [50] Liang J, Jiang Y, Wang M C, Kang X Y, Zhang W T, Zhang L N, Zhao S D. Responses to climate change in radial growth of *Picea schrenkiana* along elevations of the eastern Tianshan Mountains, northwest China. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 117-127.
- [51] D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 289-305.
- [52] Wilson R, D'Arrigo R, Buckley B, Büntgen U, Esper J, Frank D, Luckman B, Payette S, Vose R, Youngblut D. A matter of divergence: tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D17): D17103.