

DOI: 10.20103/j.stxb.202501050028

刘昶, 蔡志同, 鲁艺, 田利军, 邹林波, 顾丽. 秦岭南麓华山松和油松气候变化响应与多情景模拟. 生态学报, 2025, 45(17): - .
Liu C, Cai Z T, Lu Y, Tian L J, Zou L B, Gu L. Climate change response and multi-scenario simulation of *Pinus armandii* and *Pinus tabuliformis* at the Southern Foothills of the Qinling Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

秦岭南麓华山松和油松气候变化响应与多情景模拟

刘昶¹, 蔡志同¹, 鲁艺¹, 田利军³, 邹林波³, 顾丽^{1,2,*}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 杨凌 712100

3 陕西省汉中市汉台区武乡林场, 汉中 723000

摘要:结合树木年轮学和 Vaganov-Shashkin 过程模型, 系统解析秦岭南麓华山松 (*Pinus armandii*) 和油松 (*Pinus tabuliformis*) 径向生长在年、月、日尺度上的气候响应机制, 并耦合 CMIP6 四种排放情景 (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) 预测其未来适应性, 为森林可持续发展提供依据。结果表明: (1) 研究区气温持续增加 ($P < 0.05$), 火地塘林区华山松在 1971—2023 年呈现显著上升的生长趋势 (Slope = 0.003, $P < 0.05$), 而武乡林区油松通过响应气温突变减缓衰退。(2) 两树种响应呈现空间-种间分异: 油松在武乡林区与前一年 10 月及当年 3、9 月气温正响应 ($P < 0.05$), 但受前年与当年 9 月降水抑制; 火地塘油松则对当年 4—8 月气温正响应, 而对前一年 8、10 月降水负响应。华山松响应模式差异更显著: 武乡林区华山松受前一年 6 月气温与当年 2、9 月降水负调控, 而火地塘华山松对当年 9 月降水显著正响应 ($P < 0.05$)。(3) Vaganov-Shashkin 模型表明: 在 5—9 月生长季期间, 华山松和油松的生长持续受到降水的限制。气温上升导致二者的生长季延长, 武乡林区华山松则通过高效排水抵消水分胁迫显著延长生长季 (0.33 天/年, $P < 0.05$)。(4) 未来情景下, 华山松树轮指数至 2064 年预计增长 4% ($P < 0.05$), 其低水分需求阈值 ($W_1 = 0.0079\%$) 优于油松 ($W_1 = 0.0397\%$) 表现着对暖干化更好的适应性。本研究为秦岭人工林应对暖干化及实现“双碳”目标提供了基于生理过程的决策工具, 可为类似气候区树种适应性研究提供参考。

关键词:气候变化; 生长分异; 径向生长; Vaganov-Shashkin 模型; 秦岭

Climate change response and multi-scenario simulation of *Pinus armandii* and *Pinus tabuliformis* at the Southern Foothills of the Qinling Mountains

LIU Chang¹, CAI Zhitong¹, LU Yi¹, TIAN Lijun³, ZOU Linbo³, GU Li^{1,2,*}

1 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Shaanxi Qinling Forest Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Yangling 712100, China

3 Wuxiang Forest Farm, Hanzhong 723000, China

Abstract: The study combines dendrochronology and the Vaganov-Shashkin process model to systematically analyze the climate response mechanisms of radial growth in *Pinus armandii* and *Pinus tabuliformis* at the southern foothills of the Qinling Mountains at annual, monthly, and daily scales. It also integrated with four CMIP6 scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) to predict their future adaptability, providing a basis for the sustainable development of forests. The results showed: (1) With a continuous increase in temperature ($P < 0.05$) in the study area, *Pinus armandii* in the Huoditang Forest District showed a significant upward growth trend from 1971—2023 (Slope = 0.003, $P < 0.05$), while *Pinus tabuliformis* in Wuxiang Forest District slowed down its decline by responding to the sudden change in temperature. (2) The responses of the two species showed spatial-interspecific divergence; *Pinus tabuliformis* in the Wuxiang Forest

基金项目: 陕西省重点研发 (2024SF-ZDCYL-05-07, 2024SF-YBXM-547); 国家重点研发计划 (2024YFF1306505)

收稿日期: 2025-01-05; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guli2012@nwfu.edu.cn

District responded positively ($P < 0.05$) to the air temperature in October of the previous year and March and September of the current year, but was suppressed by precipitation in September of the previous and current year, while *Pinus tabuliformis* in Huoditang Forest District responded positively to the air temperature in April-August of the current year, and negatively to the precipitation in August and October of the previous year. The differences in response patterns of *Pinus armandii* were even more significant; *Pinus armandii* in Wuxiang Forest District was negatively regulated by the temperature in June of the previous year and precipitation in February and September of the current year, while *Pinus armandii* in Huoditang Forest District responded significantly positively ($P < 0.05$) to precipitation in September of the current year. (3) The Vaganov-Shashkin model indicated that *Pinus armandii* and *Pinus tabuliformis* were continuously limited by precipitation during the May-September growing season, that increasing temperatures resulted in a longer growing season for both, and that *Pinus armandii* in Wuxiang Forest District significantly lengthened the growing season by efficiently mitigating water stress through improved drainage (0.33 days/year, $P < 0.05$). (4) Under future scenarios, the tree ring index of *Pinus armandii* is projected to increase by 4% ($P < 0.05$) by 2064, with its lower water demand threshold ($W_1 = 0.0079\%$) outperforming that of *Pinus tabuliformis* ($W_1 = 0.0397\%$), demonstrating superior adaptability to warming-drying conditions. This study provides a physiological process-based decision-making tool for the Qinling Mountains planted forests to cope with warming-drying trends and to achieve carbon peaking and carbon neutrality goals. It can be used as a reference for studying tree species adaptation in similar climatic zones.

Key Words: climate change; growth divergence; radial growth; Vaganov-Shashkin model; Qinling Mountains

自 20 世纪以来,全球尺度变暖主导着气候变化的各个方面。2011—2020 年全球平均气温比工业化前水平高 1.09℃,且未来几十年变暖趋势仍将持续^[1]。气温升高和降水格局改变引起的气候变化会导致生态系统功能发生显著性转变^[2]。树木年轮作为一种高精度的定年材料,以其高分辨率的特性,为研究森林生态系统对气候变化的响应提供了宝贵的信息^[3]。然而,研究发现树木生长对气候变化的响应出现了差异,这种现象不仅出现在区域之间^[4-5],而且在不同树种之间以及同一树种的不同个体间也有所体现^[6-8]。这种对气候敏感性下降或生长减缓的情况被称为分异现象^[9]。揭示树木生长分异已成为全球气候变化和树轮气候学的研究重点。

目前,暖干化、干旱胁迫和温度阈值是出现响应分异的主要原因^[10-12]。Tumajer 等^[13]发现在低海拔地区和中高海拔地区的挪威云杉(*Picea abies*)生长趋势差异增大,并肯定了温度和降水的有效性大于林分因子。温晓示等^[14]在辽东山区的研究也表明了气候因子对落叶松径向生长的调控作用大于林分因子。现有研究多依赖统计模型(如逐步回归、混合效应模型)建立气候—生长的经验关系^[15-16],虽能识别主导因子,却难以解析多时间尺度的生理驱动机制,导致对未来气候情景的适应性预测存在较大偏差。相比之下,基于过程机制的 Vaganov-Shashkin 模型通过耦合细胞生长、分裂与成熟等生理过程^[17],可更真实地模拟气候胁迫下的树木生长动态,为量化生长分异提供了新范式。

人工林受气候变暖影响出现了不同程度的衰退甚至死亡现象^[18]。秦岭作为中国南北气候过渡带的关键区域,对研究人工林的气候响应机制具有重要指示意义。油松和华山松广泛分布于秦岭中段海拔 1100—2000m 地带^[19],蓄积量占该区域针叶林总量的 80%^[20],但其气候响应机制仍存争议。秦岭东段研究表明油松生长受温度和降水的协同调控,而华山松主要依赖当年降水^[21]。但在中段半湿润区,增温对二者生长均呈现促进作用^[22]。然而,现有研究多聚焦统计相关分析,尚未耦合过程模型与多情景气候以量化未来生长趋势。基于此,研究提出假设:油松与华山松对气候因子的响应模式存在显著空间和种间差异,其差异由根系策略与水热因子互作驱动。以秦岭中段南麓的华山松和油松为对象,采用 Vaganov-Shashkin 模型解析其径向生长在年、月、日尺度上的气候响应机制,并耦合 CMIP6 四种排放情景预测未来 40 年的生长动态。研究结果可为过渡带人工林适应性管理及“双碳”目标的实现提供科学依据。

1 研究区及取样

秦岭陕西段(32°40′—34°35′N, 105°30′—110°05′E)东以灞河与丹江河谷为界,西止于嘉陵江,北以渭河为界,南以汉江为边,约占陕西省总面积的 28.4%。研究区(图 1)位于陕西秦岭中段南麓的汉中市武乡林区和安康市火地塘林区,地处北亚热带湿润季风气候,主要土壤类型为山地棕壤。油松和华山松在山坡和山脊等坡度较大、土层较薄的区域形成优势群落,构成连续分布的纯林体系^[23]。1960—2023 年时间跨度内,武乡林区的年平均气温为 8.82℃,年平均降水为 861.26mm,火地塘林区的年平均气温为 8.61℃,年平均降水为 911.36mm,降水主要集中在 3—11 月(图 2)。研究以树干通直无病虫害的油松和华山松人工纯林作为对象,在胸高处(1.3m)沿东向和北向各采集一个树芯样本,采样点信息见表 1。

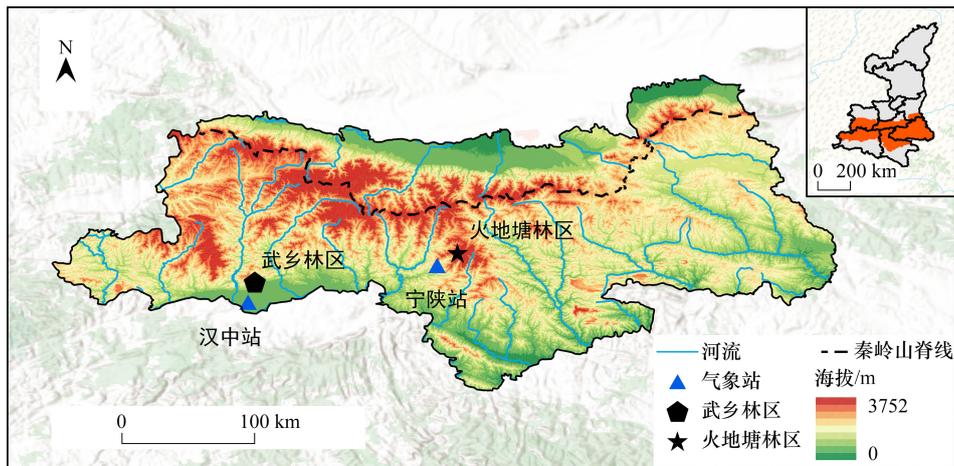


图 1 研究区位置图

Fig.1 Map of the study area

2 数据和方法

2.1 树芯处理

参考 Stokes 等^[24]的方法对树芯样本进行预处理工作。在 LinTAB6 年轮宽度测量仪(精度 0.001mm)下对树轮宽度进行测量,采用 R 中的 dplR 包^[25]对其进行交叉定年,排除误差较大的样芯,使用 i.detrend 函数中 Spline 样条函数($n_{yrs} = 30, f = 0.5$)对年轮宽度数据进行去生长趋势,以消除树木自然生长对年轮宽度的影响,仅保留与气候相关的生长变化,再采用双权重平均法获取最终的标准年表(Standardize chronology)。生成的 4 个采样点标准年表的样本总体代表性(Expressed population signal EPS)介于 0.866—0.965 之间,均超过阈值 0.85。由于年表一阶自相关性较强(表 1),采用 R 语言中的 treeclim 包^[26],选择前一年 6 月至当年 9 月的气候数据与年表进行以 25 年为窗口单次滑动 1 年的滑动响应分析。

2.2 气候数据处理

本文所采用的观测气候数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)中的陕西汉中站(33°04′N, 107°59′E, 509.5m)和宁陕站(33°19′N, 108°19′E, 802.4m)。使用临近插值法对气象站缺失数据进行补充^[27]。由于观测气候与研究区存在海拔差,为获得研究区域实际气温,采用简单垂直气温递减率对气温数据进行校正^[28]。分别对汉中和宁陕站 1960—2023 年和未来 2024—2064 年四种情景下气候数据进行 Mann-Kendall 检验^[29](MK 检验),并对气候数据(图 3)和标准化年表(图 6)采用线性拟合计算其趋势斜率,斜率正负代表上升和下降趋势,其大小代表上升下降程度高低^[30]。通过距平法和距平百分率^[31]分析未来时期温度、降水相比基准时期(1960—2023 年)的变化。

表 1 采样点信息表

Table 1 Sampling site information sheet

| 采样点 Sampling site | 武乡林区油松 <i>Pinus tabuliformis</i> of WX | 武乡林区华山松 <i>Pinus armandii</i> of WX | 火地塘林区油松 <i>Pinus tabuliformis</i> of HDT | 火地塘林区华山松 <i>Pinus armandii</i> of HDT |
|---|--|---|--|---|
| 经度 Longitude | 107°4'37"E | 107°4'27"E | 108°26'41"E | 108°26'39"E |
| 纬度 Latitude | 33°15'15"N | 33°15'28"N | 33°26'4"N | 33°26'9"N |
| 坡向 Slope aspect | 南 | 南 | 南 | 南 |
| 坡度 Slope/(°) | 29 | 27 | 32 | 26 |
| 海拔 Altitude/m | 1456 | 1480 | 1540 | 1550 |
| 树种组成 Tree species composition | 9 油 1 侧 | 9 华 1 白 | 8 油 2 栎 | 9 华 1 落 |
| 林龄 Stand age | 42 | 54 | 50 | 53 |
| 株数密度 Plant density/(株/hm ²) | 1100 | 950 | 1083 | 1267 |
| 年表区间 Chronology interval | 1986—2023 | 1974—2023 | 1971—2023 | 1971—2023 |
| 样本量/样芯 Sample size/core | 53/106 | 54/108 | 31/62 | 34/68 |
| 一阶自相关系数 Auto-correlation order | 0.187 | 0.276 | 0.390 | 0.331 |
| 信噪比 Signal to noise ratio | 13.547 | 9.084 | 9.558 | 11.323 |
| 平均敏感度 Mean sensitivity | 0.280 | 0.304 | 0.178 | 0.308 |
| 样本总体代表性 Expressed population signal | 0.931 | 0.866 | 0.868 | 0.911 |

WX: 武乡林区 Wuxiang forest district; HDT: 火地塘林区 Huoditang forest district

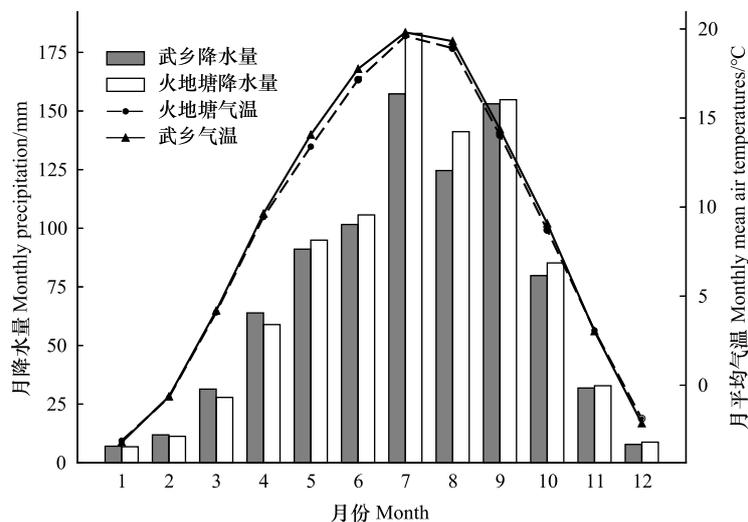


图 2 研究区月气候

Fig.2 Monthly climate in the study area

CMIP6 气候模式模拟了 1850—2014 年的历史数据,并预测了 SSP126、SSP245、SSP370 和 SSP585 四种未来情景。SSP126、SSP245 和 SSP370 分别代表低、中、高社会脆弱性影响,SSP585 是唯一能在 2100 年达到 $8.5\text{W}/\text{m}^2$ 辐射强迫的情景^[32]。将 7 个气候模式的历史模拟数据与汉中、宁陕站观测数据进行对比,并用泰勒图谱评估模拟能力。泰勒图谱的纵轴代表模式与观测值的标准差,虚线圆弧代表相关性,对角线虚线代表均方根误差^[33]。基于泰勒图谱评估结果(图 4),选择相关性最好、标准差和均方误差最小的 CMCC-ESM2 气温模式和 EC-Earth3-Veg 降水模式作为后续研究基础,其分辨率分别为 1° 和 250km ,通过单点降尺度法获取并校正研究区的未来气候数据^[34]。

2.3 Vaganov-Shashkin 过程模型

Vaganov-Shashkin 模型(VS 模型)在细胞过程动力学的基础上,假设形成层中的细胞的生长率仅受到物

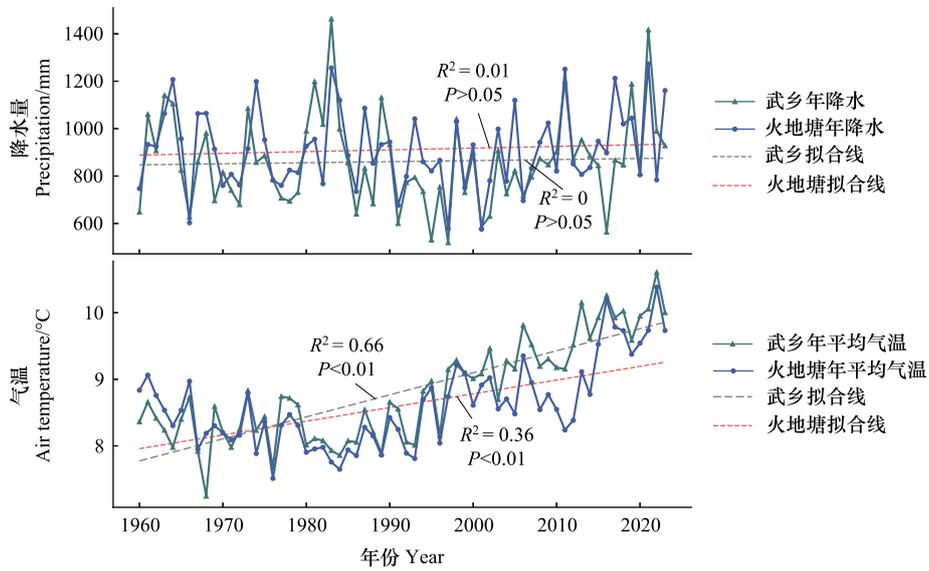


图 3 年均温和年降水量变化

Fig.3 Differences in temperature and precipitation

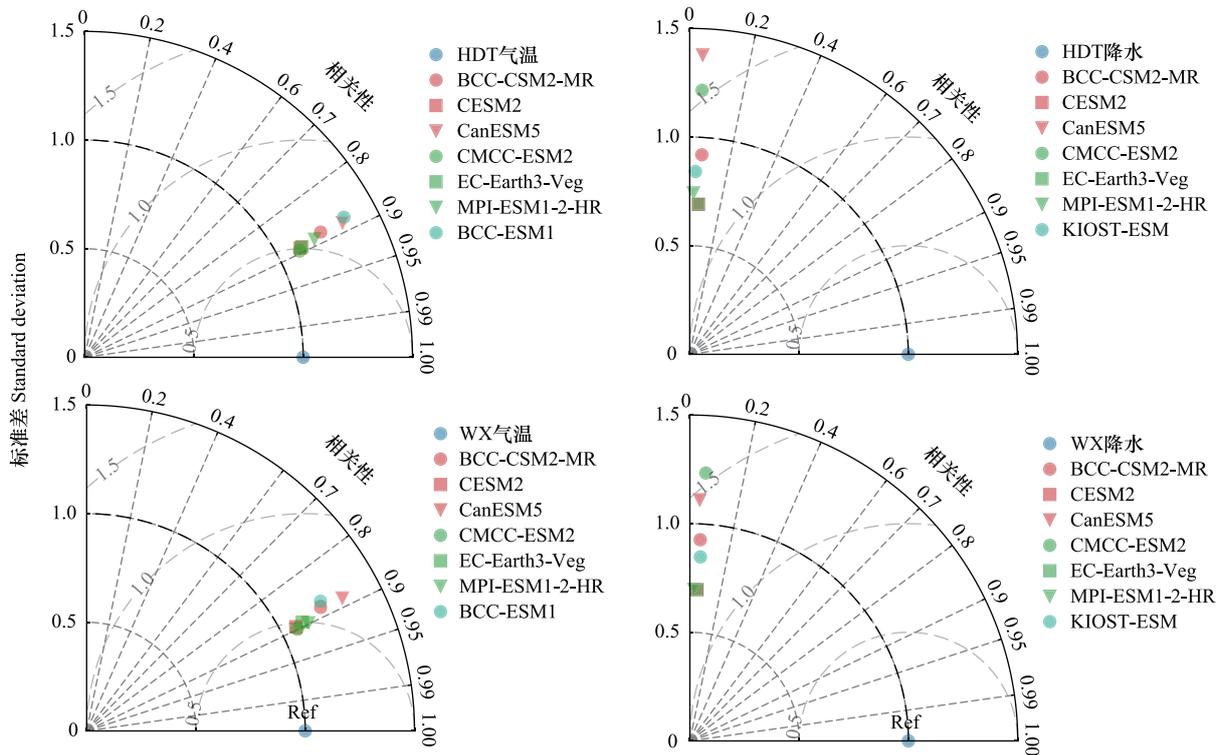


图 4 火地塘林区气温、降水和武乡林区气温、降水泰勒图

Fig.4 Taylor Map of temperature and precipitation in Huoditang Forest District and temperature and precipitation in Wuxiang Forest District

蓝色 Ref 表示观测点;BCC-CSM2-MR:北京气候中心气候系统模式第二版中等分辨率;CESM2:社区地球系统模式第二版;CanESM5:加拿大地球系统模式第五版;CMCC-ESM2:欧洲-地中海气候变化中心地球系统模式第二版;EC-Earth3-Veg:欧洲联合地球系统耦合植被模式第三版;MPI-ESM1-2-HR:马普所地球系统模式 1.2 高分辨率版;BCC-ESM1:北京气候中心地球系统模式第一版;KIOST-ESM:韩国海洋科学技术院地球系统模式

理环境变量控制^[35],是一种耦合光照,气温和土壤水分计算树木年轮日增长率的过程模型^[36],模型公式如下:

$$Gr(t) = GrE(t) * \min\{GrT(t), GrW(t)\} \quad (1)$$

式中, $Gr(t)$ 为第 t 天树木年轮总体生长速率; $GrE(t)$ 、 $GrT(t)$ 、 $GrW(t)$ 分别为光照 E 、气温 T 和土壤水分 W 引发的逐日生长速率。根据研究查询油松和华山松生长过程的相关信息参数^[37],在 Matlab 2023a 软件对模型输入的参数(温度参数 T_1-T_4 、湿度参数 W_1-W_4 、根深 Rootd、土壤最大渗水率 P_{max} 、排水系数 Rated 以及开始生长温度 T_g)使用拉丁超立方^[38]进行迭代,确保 VS 模型输入参数在合理范围的最优性。将最终校准参数(表 2)和未来气候数据(SSP126 至 SSP585, 2024—2064 年)作为 VS 模型的驱动数据,模拟不同情景下的树木生长状况。

表 2 四种树木年轮 VS 模型参数

Table 2 Four types of tree rings VS model parameters

| 参数 Parameters | 参数描述 Parameter description | 武乡林区华山松 <i>Pinus armandii</i> of WX | 武乡林区油松 <i>Pinus tabuliformis</i> of WX | 火地塘林区油松 <i>Pinus tabuliformis</i> of HDT | 火地塘林区华山松 <i>Pinus armandii</i> of HDT |
|------------------|---|---|--|--|---|
| T_1 | 树木生长的最低温度 Minimum temperature for tree growth(°C) | 0.3833 | 0.5283 | 0.1453 | 6.5122 |
| T_2 | 最佳生长温度下限 Lower end of range of optimal temperatures(°C) | 10.1039 | 19.6580 | 11.4072 | 19.6223 |
| T_3 | 最佳生长温度上限 Upper end of range of optimal temperatures(°C) | 22.2068 | 20.1865 | 20.0987 | 21.0742 |
| T_4 | 树木生长最高温度 Maximum temperature for tree growth(°C) | 25.7933 | 34.5422 | 30.3363 | 29.3570 |
| W_1 | 树木生长所需的最低土壤湿度 Minimum soil moisture for tree growth(%v/v) | 0.0079 | 0.0397 | 0.0880 | 0.0827 |
| W_2 | 最佳土壤水分范围下限 Lower end of the optimal soil moisture range(%v/v) | 0.1913 | 0.1195 | 0.1356 | 0.1699 |
| W_3 | 最佳土壤水分范围上限 Upper end of the optimal soil moisture range(%v/v) | 0.3901 | 0.3194 | 0.3030 | 0.4661 |
| W_4 | 树木生长的最大土壤湿度 Maximum soil moisture for tree growth(%v/v) | 0.9348 | 0.7104 | 0.9541 | 0.7147 |
| T_g | 高于生长开始温度的累积温度 Temperature sum for initiation of growth(°C) | 127 | 112 | 124 | 80 |
| Rootd | 根系深度 Depth of root system(mm) | 898 | 1019 | 1600 | 1298 |
| P_{max} | 土壤饱和和最大日降水量 Maximum daily precipitation for saturated soil(mm/d) | 22 | 22 | 23 | 23 |
| Rated | 土壤排水系数 Coefficient for water drainage from soil | 0.0135 | 0.0060 | 0.0070 | 0.0115 |
| k_1 | 渗透到土壤的降水比例 Fraction of precipitation penetrating the soil | 0.9000 | 0.9000 | 0.9000 | 0.9000 |
| k_2 | 蒸腾水分系数 Water coefficient for transpiration(mm/d) | 0.2500 | 0.2500 | 0.2500 | 0.2500 |
| k_3 | 蒸腾温度系数 Temperature coefficient for transpiration(1/°C) | 0.1800 | 0.1800 | 0.1800 | 0.1800 |

3 结果与分析

3.1 气候数据

历史与未来气候数据的突变特征分析表明,研究区气温升温显著($P < 0.05$)呈现阶段性转折,而降水量未发生显著趋势性改变(图 3)。MK 检验(图 5)显示:武乡林区历史时期(1960—2023 年)气温在 1984 年与

1999 年发生突变,2001 年后升温显著。未来情景下,温度均呈现上升趋势 ($P < 0.05$),武乡和火地塘林区气温突变时间点相近,其中 SSP585 情景在 2046 年后出现显著升温趋势 ($P < 0.05$)。四种情景模拟下的降水量数据未显示出明显的拐点,且 UFK 统计值未超过临界线,表明未来降水量没有发生显著变化。根据气温突变点将研究年份分成 1960—1984、1985—1999 和 2000—2023 年(历史)三个阶段,2024—2040、2041—2047 和 2048—2064 年(未来)三个阶段。

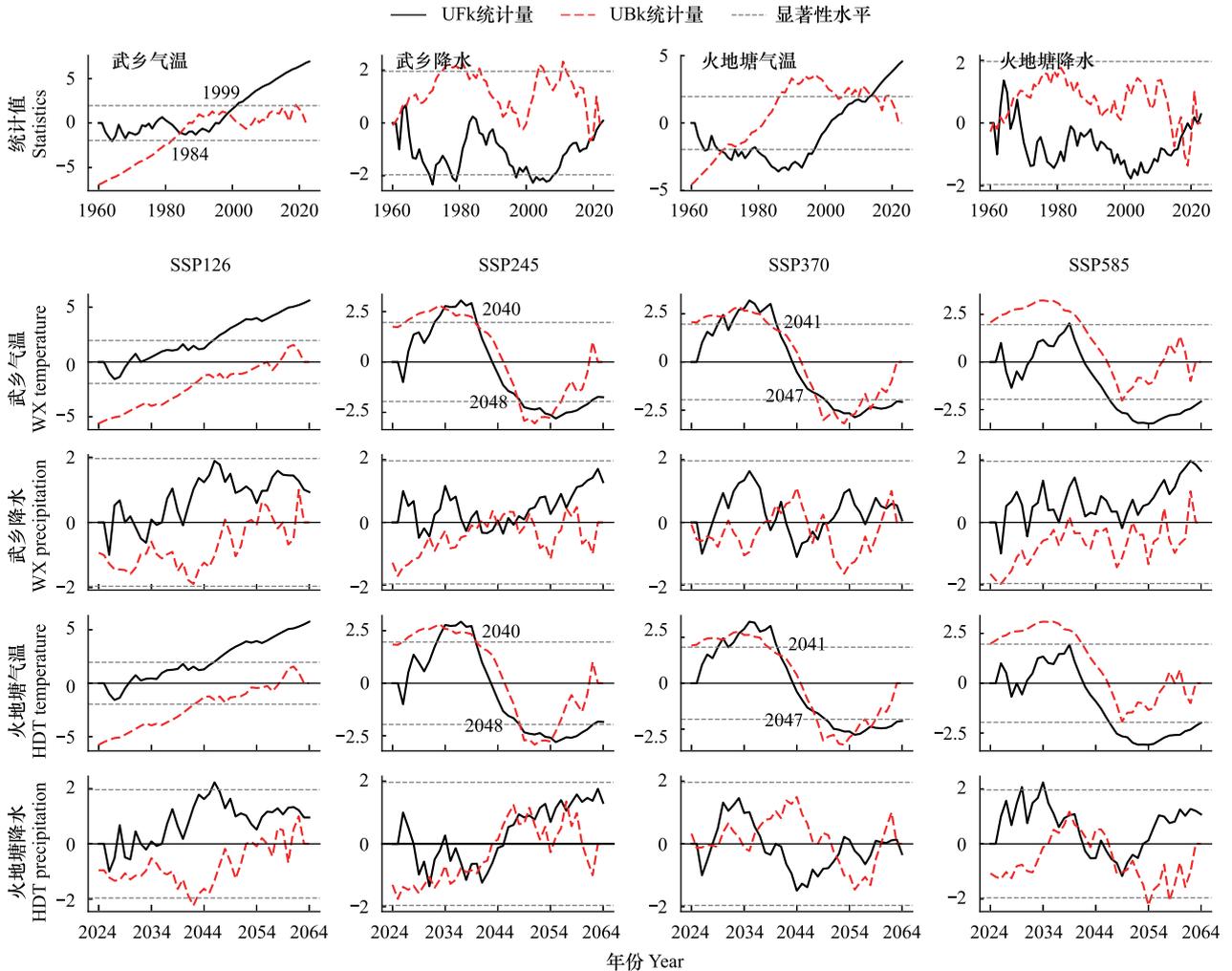


图5 历史和未来时期4种情景MK检验

Fig.5 MK test for 4 scenarios for historical and future period

UFk:统计量正序列 Forward sequential statistic; UBk:统计量负序列 Backward sequential statistic;灰色虚线为显著性水平线 ($\pm 1.96, P < 0.05$)

3.2 年、月和日尺度下树轮响应分析

3.2.1 径向生长年趋势分析

不同林区树木径向生长的年际趋势对气候突变的响应存在显著差异。火地塘林区并未出现气候突变点,因此仅对整个时间段的树轮指数计算趋势。结果(图6)显示:升温突变后,武乡林区油松和华山松年表整体呈下降趋势(Slope: -0.001)。在第一个突变点发生之后,武乡林区油松(Slope: -0.021)呈现下降趋势,而华山松(Slope: 0.001)呈现上升趋势,在第二个突变点发生时,该地区生长分异现象。油松(Slope: -0.003)下降趋势逐渐变缓,华山松(Slope: 0.006)呈现上升趋势,且上升趋势变强。火地塘林区树木生长出现分异,油松标准年表(Slope: -0.001)呈现下降趋势,而华山松(Slope: 0.003)呈现显著上升趋势 ($P < 0.05$)。

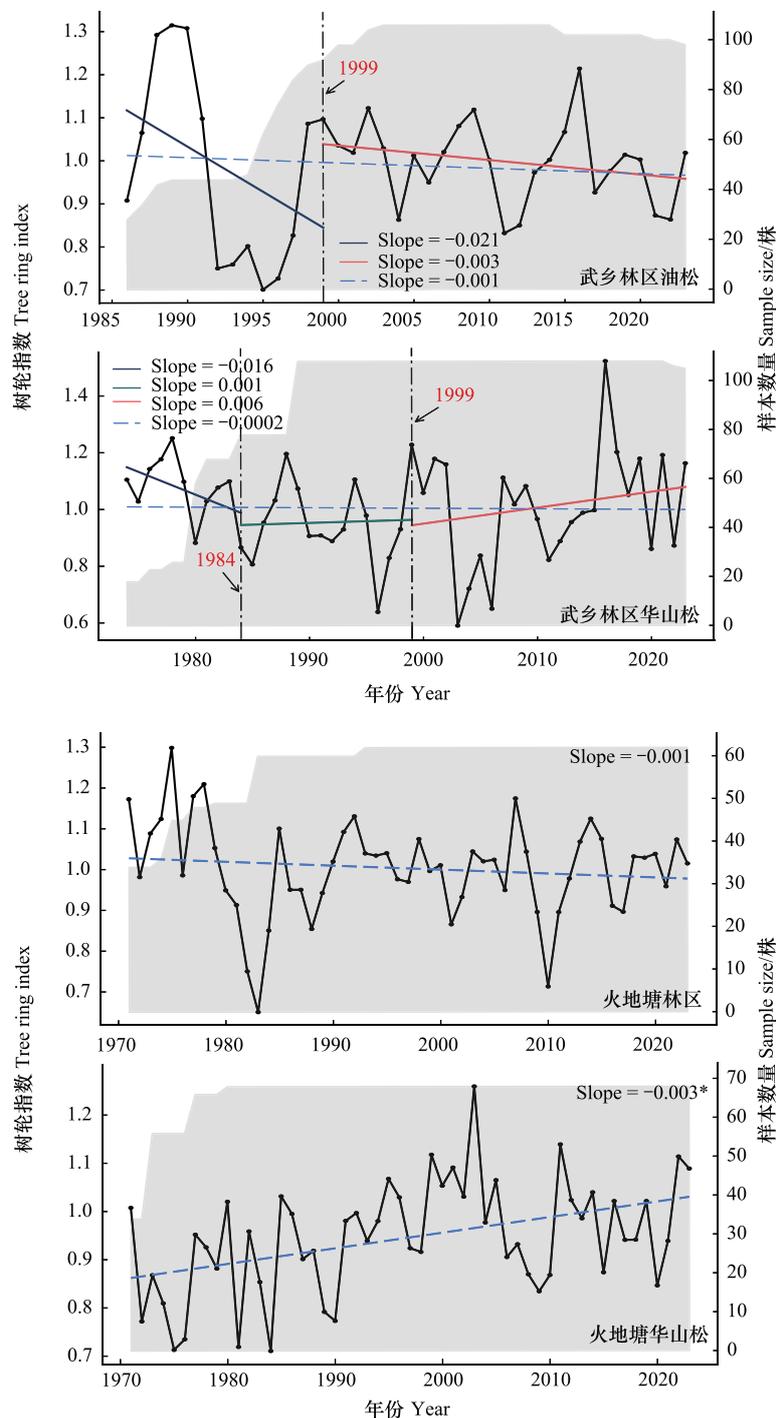


图6 武乡林区油松、华山松和火地塘林区油松、华山松标准年表

Fig.6 Standard chronology of *Pinus tabuliformis* and *Pinus armandii* in Wuxiang Forest District and *Pinus tabuliformis* and *Pinus armandii* in Huoditang Forest District

灰色阴影为样本数量;垂直虚线为突变年份,分别为1984和1999年;星号“*”代表趋势显著($P < 0.05$)

3.2.2 树轮月气候滑动响应分析

树木径向生长与月尺度气候因子的响应关系呈现显著的空间分异与树种特异性(图7)。在武乡林区,油松与上一年10月、当年3、9月气温以及当年4月降水显著正响应,与上一年9月、当年9月降水显著负响应($P < 0.05$);华山松与上一年10月和当年3月气温显著正响应,与上一年6月气温和当年2、9月降水显著负

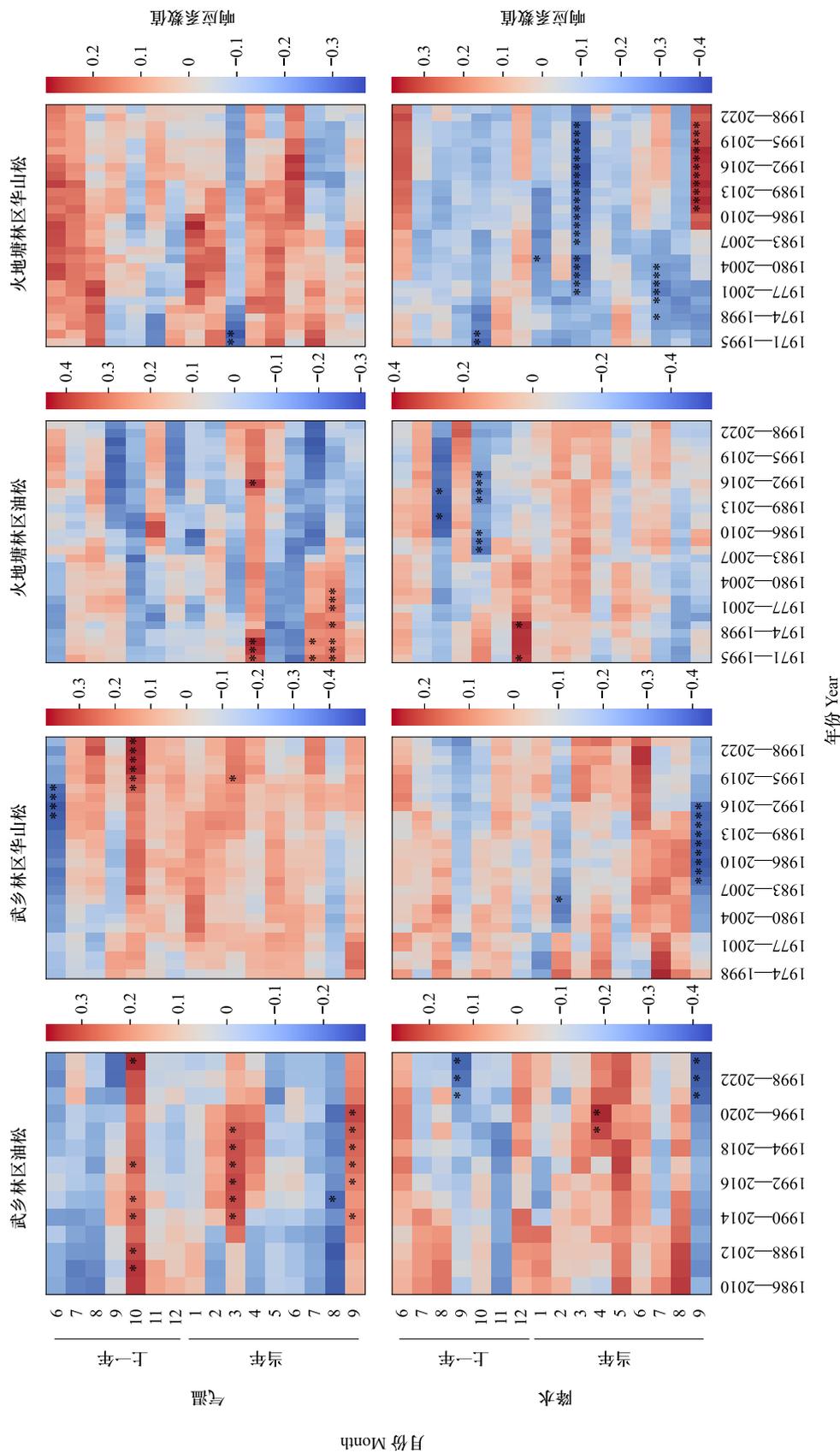


图 7 树轮指数与月均气温和降水的滑动响应分析
 Fig. 7 Analysis of sliding response of tree-ring index to monthly average temperature and precipitation

图 7 树轮指数与月均气温和降水的滑动响应分析

Fig.7 Analysis of sliding response of tree-ring index to monthly average temperature and precipitation

TEM:气温 temperature; PRE:降水 precipitation; prev:上一年 previous year; curr:当年 current year

响应($P < 0.05$)。在火地塘林区,油松与当年4、7和8月气温以及上一年12月降水表现正响应,与上一年8和10月降水表现连续的负响应($P < 0.05$);而华山松与上一年10月降水显著负响应,与当年1月和多个窗口的3和7月降水连续显著负响应,与当年9月降水显著正响应($P < 0.05$)。

3.2.3 VS 模型重建每日生长动态

基于 VS 模型的日尺度生长动态模拟揭示了气温与水分对树木生长的阶段性调控作用。武乡林区树木总体生长率曲线(G)呈现单峰状,而火地塘林区树木总体生长率曲线呈现双峰状(图 8 和图 9)。在生长季的前期和末期,温度生长率曲线(g_T)低于水分引起的生长率曲线(g_W),这表明两种树木生长的开始和结束均由温度控制,而在树木生长的中期,土壤水分严重影响了径向生长。统计多年生长季日数(图 8 和图 9)并计算其趋势。树木的生长季都在 150—200 日之间,火地塘林区华山松的生长日数最短。武乡林区华山松的生长季天数以每年 0.33 天的趋势显著上升($P < 0.05$)。

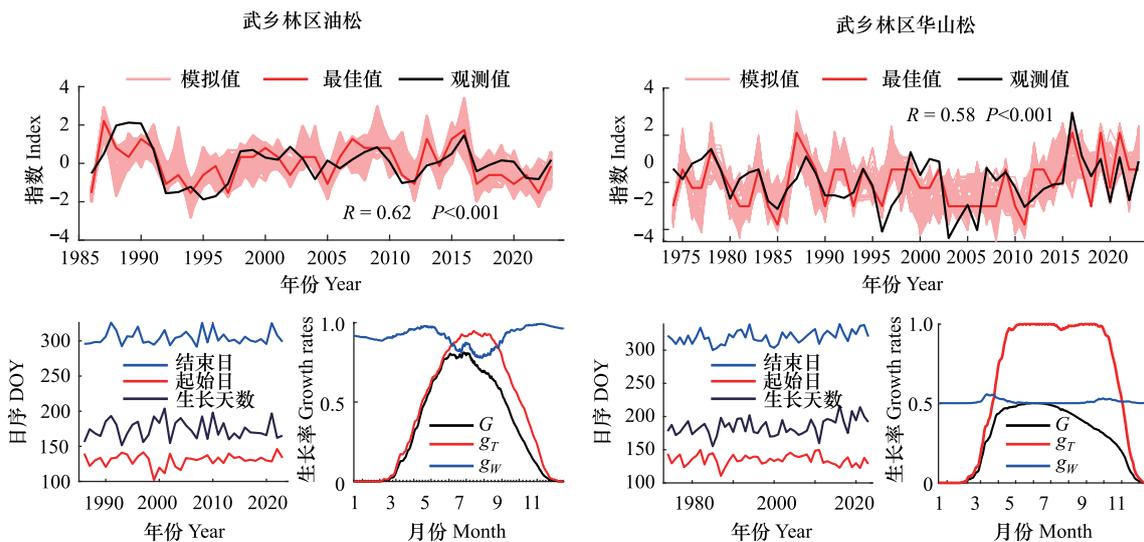


图 8 武乡林区 VS 模型拟合结果

Fig.8 VS model fitting results for Wuxiang Forest District

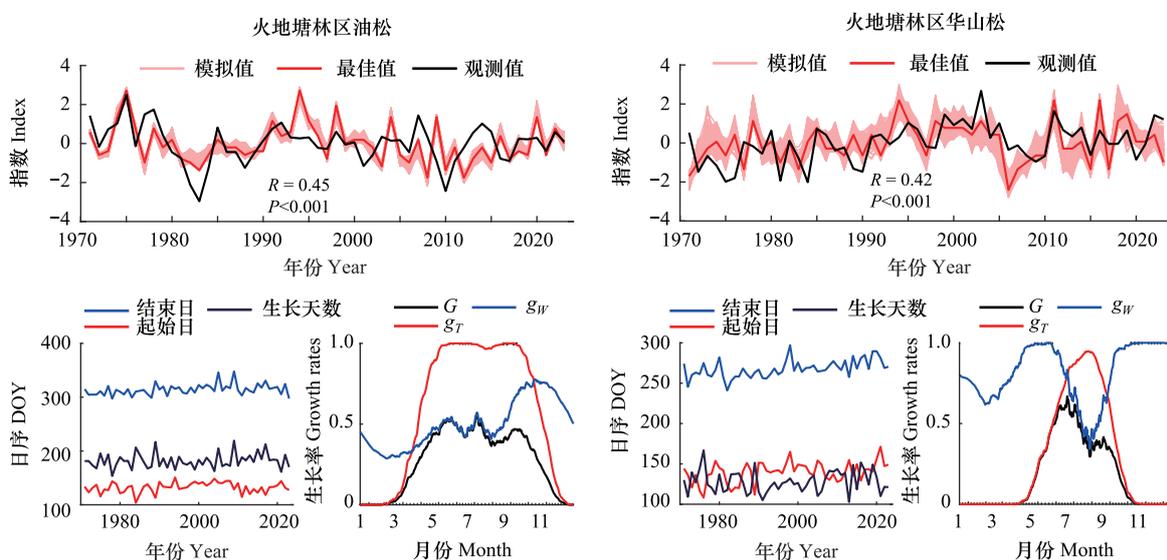


图 9 火地塘林区 VS 模型拟合结果

Fig.9 VS model fitting results for Huoditang Forest District

图 1 中粉色阴影为模拟值的集合

3.3 未来情景树轮指数变化分析

多情景模拟显示,华山松在未来暖干化气候下表现出普遍适应性优势,而油松的生长响应则受排放情景强度的调控。未来情景下,随着 CO₂浓度增加,气温上升,降水量则呈现“先减后增再减”的波动模式(表 3)。油松的适应性呈现情景依赖性:武乡林区油松仅在 SSP126 情景下径向生长显著上升(Slope: 0.0014, $P < 0.05$),而在 SSP245 情景呈“降-升-降”波动,SSP370 与 SSP585 情景下则持续衰退(图 10);火地塘林区油松在 SSP126 与 SSP585 情景下亦表现下降趋势,且在 SSP370 情景第一阶段(2024—2041 年)下降速率(Slope: -0.009)较武乡林区(Slope: 0.0006)更剧烈。相比之下,华山松在四种情景下均保持生长优势:武乡林区华山松在 SSP245 与 SSP370 情景下虽呈“先增后减”趋势,但其 SSP245 情景第二阶段(2041—2047 年)上升速率(Slope: 0.0067)显著高于 SSP370 情景(Slope: 0);火地塘林区华山松(Slope: 0.0128)在 SSP370 情景下生长率于第二阶段快速回升,增幅远超武乡林区华山松(Slope: 0)。至 2064 年,华山松树轮指数预计整体增加 4%,凸显其对暖干化气候的强适应能力。

表 3 未来 SSP 情景下气温和降水的预测变化

Table 3 Projected changes in temperature and precipitation under future SSP scenarios

| 项目 Item | 指标 Indicators | 1960—2023 年 | | 2024—2064 年 | | |
|----------------------------|------------------|----------------|--------|-------------|--------|--------|
| | | 基准值 Base value | SSP126 | SSP245 | SSP370 | SSP585 |
| 武乡温度 WX Temperature | 气温平均值 | 8.82 | 11.26 | 11.36 | 11.35 | 11.70 |
| | 气温距平值 | 0 | 2.44 | 2.54 | 2.53 | 2.88 |
| | 距平百分率 | 0 | 27.6 | 28.8 | 28.7 | 32.7 |
| 武乡降水 WX Precipitation | 年降水平均值 | 861.3 | 881.76 | 767.92 | 841.07 | 833.49 |
| | 降水距平值 | 0 | 20.46 | -93.38 | -20.23 | -27.81 |
| | 距平百分率 | 0 | 2.4 | -10.8 | -2.3 | -3.2 |
| 火地塘温度 HDT Temperature | 气温平均值 | 8.61 | 11.85 | 11.99 | 11.96 | 12.33 |
| | 气温距平值 | 0 | 2.24 | 2.38 | 2.35 | 2.72 |
| | 距平百分率 | 0 | 26 | 27.6 | 27.3 | 31.6 |
| 火地塘降水 HDT Precipitation | 年降水平均值 | 911.4 | 956.89 | 806.13 | 880.83 | 875.87 |
| | 降水距平值 | 0 | 45.49 | -105.27 | -30.57 | -35.53 |
| | 距平百分率 | 0 | 5 | -11.6 | -3.4 | -3.9 |

4 讨论

气候变暖引发的温度突增导致两种树种径向生长速率呈现显著分异(图 6),尽管两树种生长均受水热协同调控,但油松在武乡林区对水热因子的正响应频率高于华山松,而火地塘林区油松则表现出对降水的滞后效应。这一现象验证了“油松与华山松气候响应模式存在显著种间与空间差异”的初步假设。滑动响应分析进一步表明(图 7),研究区油松对温度的敏感性逐渐衰减,并转向对降水的负响应,尤其在火地塘林区,其响应模式的转变更为剧烈,暗示水分的动态调整是驱动生长趋势转折的关键因子。

VS 模型解析表明,响应差异源于根系策略与水热因子的互作效应。油松作为深根型树种^[39](Rootd = 1019, 1600 mm),其耐旱特性依赖前一年 8—10 月降水补给深层土壤水分,但在高温湿润的背景下,黏重土壤的高持水性导致雨季浅层积水,抑制根系呼吸并引发生长代谢衰减^[40]。同时,深层土壤板结与孔隙度下降^[41]进一步削弱其排水能力(Rated = 0.0060, 0.0070),形成“水分饱和-缺氧胁迫-生长衰退”的负反馈循环。相比之下,华山松的浅层根系^[42](Rootd = 898, 1298 mm)与高排水效率(Rated = 0.0115, 0.0135)使其能够快速响应当年 3—9 月降水,规避土壤过湿风险,这种策略在干旱的武乡林区尤为显著。秦岭南坡研究表明温度对树木生长的主导作用^[43],本研究也证明了升温对生长具有多重影响:作为生长季起止的关键调控因子,温度上升显著延长火地塘华山松生长季($P < 0.05$),增强光合作用促进管胞数量的增长并加速水分蒸发^[44],最终增加了全年生长速率(G)。

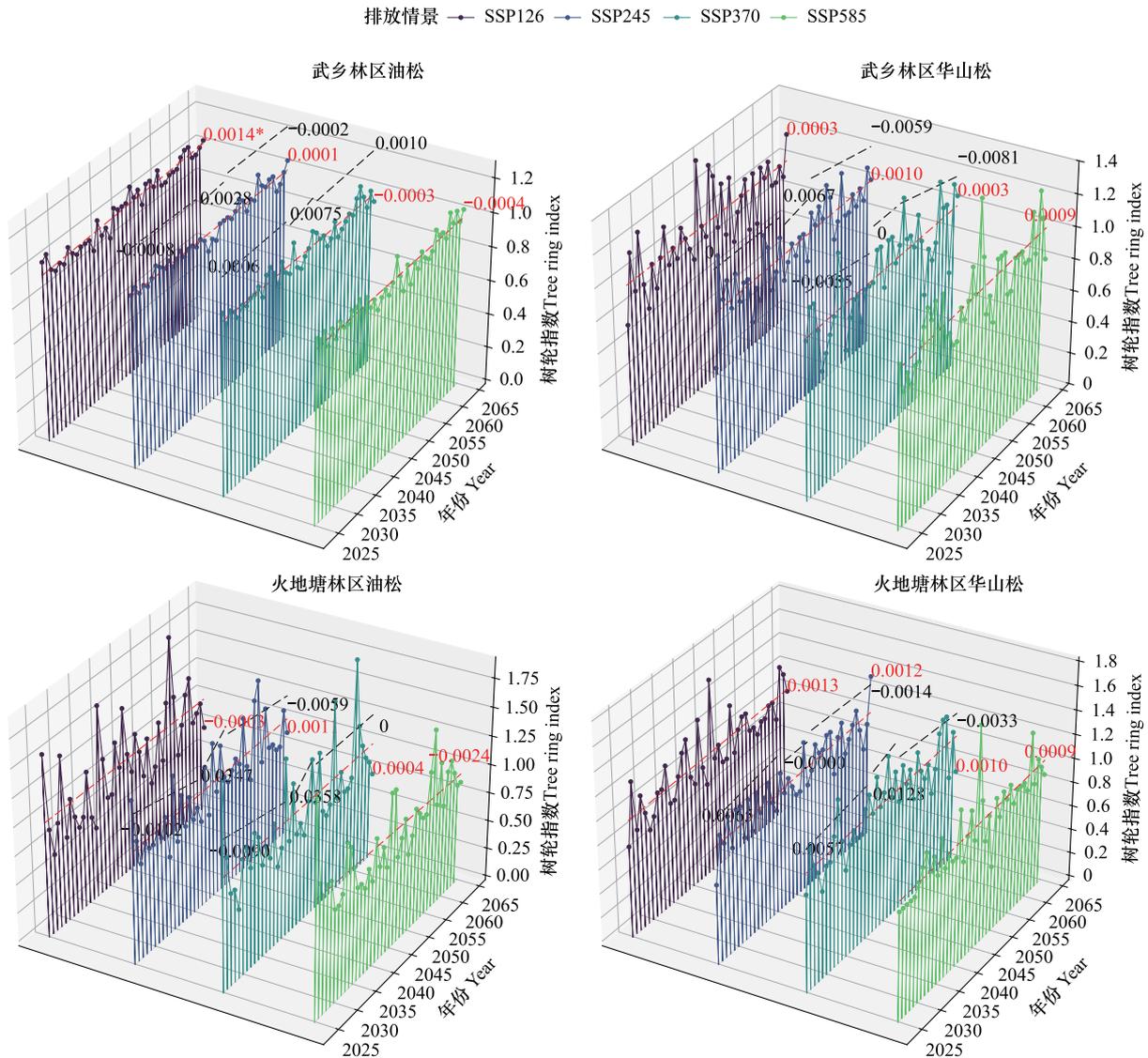


图 10 未来气候情景树轮指数模拟

Fig.10 Tree ring index modelling of future climate scenarios

未来情景下,油松的生长呈现排放情景依赖性:在 SSP126 低排放情景下,武乡林区受益于 CO_2 浓度增加与适度的升温,径向生长显著提升(Slope=0.001, $P < 0.05$);但在中高排放情景下,降水波动与高温协同引发水分补给机制崩溃^[45],尤其在火地塘油松林,土壤局部易板结限制深层水分运输,导致生长率在 SSP370 初期骤降。相比之下,华山松的浅层根系策略与低水分需求阈值(W_1)将支撑其在暖干化中的适应性优势,而油松的深层水分依赖(W_2)在降水波动加剧下面临更高风险。尽管模拟结果受限于气候模式不确定性及人为干扰因素,本研究仍为过渡带人工林管理提供了关键启示:优先配置华山松,并通过深层松土优化油松水分利用效率,助力提升秦岭森林的气候韧性。

5 结论

本研究证实油松与华山松的气候响应分异由根系策略与水热因子互作驱动,并得出以下结论:1971—2023 年气候变暖背景下,火地塘林区华山松呈现显著生长加速(Slope=0.003, $P < 0.05$),而武乡林区油松通过气温突变响应机制减缓了原有衰退趋势。华山松凭借浅层根系(Rootd=898, 1298 mm)与高排水效率(Rated

=0.0115, 0.0135), 优先利用当年降水并规避土壤过湿风险, 而油松依赖深层根系 ($Rootd = 1019, 1600 \text{ mm}$) 的水分补给策略在暖湿化下面临黏重土壤滞水胁迫, 导致生长衰退。未来情景模拟表明, 至 2064 年华山松树轮指数将增长 4%, 其浅层根系与低水分需求阈值 ($W_1 = 0.0079\%$) 在 SSP585 情景下显著优于油松。研究强调根系策略是决定树木适应性的核心机制, 建议优先配置华山松并优化油松深层水分管理, 为秦岭人工林应对暖干化及“双碳”目标提供可量化的生态决策依据。

参考文献 (References):

- [1] Zhang J T, Ren G Y, You Q L. Assessing the escalating human-perceived heatwaves in a warming world: The case of China. *Weather and Climate Extremes*, 2024, 43: 100643.
- [2] Liu Z G, Chen Z, Yang M, Hao T X, Yu G R, Zhu X J, Zhang W K, Ma L X, Dou X J, Lin Y, Luo W X, Han L, Sun M Y, Chen S P, Dong G, Gao Y H, Hao Y B, Jiang S C, Li Y N, Li Y Z, Liu S M, Shi P L, Tan J L, Tang Y K, Xin X P, Zhang F W, Zhang Y J, Zhao L, Zhou L, Zhu Z L. Precipitation consistently promotes, but temperature oppositely drives carbon fluxes in temperate and alpine grasslands in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 344: 109811.
- [3] 苏凯, 白红英, 张扬, 黄晓月, 秦进. 基于树轮-气候资料的 160 多年来秦岭太白山降水变化特征重建. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1467-1475.
- [4] 王兆鹏, 张冬有, 张同文, 罗陶然, 王新瑞, 李祥友, 杜秉运, 宋可心. 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. *生态学报*, 2024, 44(17): 7646-7661.
- [5] 林小乔, 许玲玲, 刘沛荣, 同小娟, 张静茹, 张劲松, 李俊, 孟平. 亚热带杉木径向生长对气候因子的响应. *生态学报*, 2024, 44(4): 1633-1646.
- [6] 高露双, 王晓明, 赵秀海. 长白山阔叶红松林共存树种径向生长对气候变化的响应. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 24-31.
- [7] 于健, 陈佳佳, 孟盛旺, 周华, 周光, 高露双, 王永平, 刘琪璟. 长白山群落交错带长白松和鱼鳞云杉径向生长对气候变暖的响应. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 46-56.
- [8] 赵浩唱, 刘小粉, 牛进松, 李秋月, 张日升, 时忠杰, 杨晓晖, 张晓. 基于 VS 模型的樟子松人工林径向生长过程及其气候响应. *陆地生态系统与保护学报*, 2023(2): 1-10.
- [9] D'Arrigo R D, Jacoby G C, Free R M. Tree-ring width and maximum latewood density at the North American tree line: parameters of climatic change. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, 22(9): 1290-1296.
- [10] 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.
- [11] Guo M M, Zhang Y D, Liu S R, Gu F X, Wang X C, Li Z S, Shi C M, Fan Z X. Divergent growth between spruce and fir at alpine treelines on the east edge of the Tibetan Plateau in response to recent climate warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276: 107631.
- [12] 赵莹, 蔡立新, 靳雨婷, 李俊霞, 崔迪, 陈振举. 暖干化加剧东北半干旱地区油松人工林径向生长的水分限制. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3459-3467.
- [13] Tumajer J, Altman J, Štěpánek P, Treml V, Doležal J, Gienciala E. Increasing moisture limitation of Norway spruce in Central Europe revealed by forward modelling of tree growth in tree-ring network. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 56-64.
- [14] 温晓示, 陈彬杭, 张树斌, 徐凯, 叶新宇, 倪伟杰, 王襄平. 不同林龄、树种落叶松人工林径向生长与气候变化的关系. *植物生态学报*, 2019, 43(1): 27-36.
- [15] Anderson-Teixeira K J, Herrmann V, Rollinson C R, Gonzalez B, Gonzalez-Akre E B, Pederson N, Alexander M R, Allen C D, Alfaro-Sánchez R, Awada T, Baltzer J L, Baker P J, Birch J D, Bunyavejchewin S, Cherubini P, Davies S J, Dow C, Helcoski R, Kašpar J, Lutz J A, Margolis E Q, Maxwell J T, McMahon S M, Piponiot C, Russo S E, Šamonil P, Sniderhan A E, Tepley A J, Vašíčková I, Vlam M, Zuidema P A. Joint effects of climate, tree size, and year on annual tree growth derived from tree-ring records of ten globally distributed forests. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 245-266.
- [16] Tumajer J, Buras A, Camarero J J, Carrer M, Shetti R, Wilmking M, Altman J, Sangüesa-Barreda G, Lehejček J. Growing faster, longer or both? Modelling plastic response of *Juniperus communis* growth phenology to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(11): 2229-2244.
- [17] Anchukaitis K J, Evans M N, Kaplan A, Vaganov E A, Hughes M K, Grissino-Mayer H D, Cane M A. Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent influence of summer drought. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(4): L04705
- [18] Carrasco G, Almeida A C, Falvey M, Olmedo G F, Taylor P, Santibañez F, Coops N C. Effects of climate change on forest plantation productivity

- in Chile. *Global Change Biology*, 2022, 28(24): 7391-7409.
- [19] 白耀玉, 韩宜洁, 王珂珂, 刘波. 秦岭山地针叶树种树木生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3715-3723.
- [20] 刘华, 侯琳, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区油松和华山松林的空间分布格局及碳储量与碳密度研究. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 5-8.
- [21] 李镇江, 于晨一, 刘升云, 闫瑞环, 黄心邓, 刘晓静, 陈志成, 王婷. 伏牛山南坡 3 种针叶树径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1178-1186.
- [22] 杨凤萍, 胡兆永, 侯琳, 蔡靖, 崔翠, 张硕新. 秦岭火地塘林区油松和华山松林乔木层净生产力与气候因子的关系. *生态学报*, 2014, 34(22): 6489-6500.
- [23] 吴恒, 党坤良, 田相林, 孙帅超, 陈书军, 赵鹏祥, 曹田健. 秦岭林区天然次生林与人工林地质量评价. *林业科学*, 2015, 51(4): 78-88.
- [24] Stokes M A, Smiley T L. *An introduction to tree-ring dating*. Tucson: University of Arizona Press, 1996.
- [25] Bunn A G. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 115-124.
- [26] Zang C, Biondi F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, 38(4): 431-436.
- [27] Zhang L, Ren D, Nan Z T, Wang W Z, Zhao Y, Zhao Y B, Ma Q M, Wu X B. Interpolated or satellite-based precipitation? Implications for hydrological modeling in a meso-scale mountainous watershed on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124629.
- [28] 翟丹平, 白红英, 秦进, 邓晨晖, 刘荣娟, 何红. 秦岭太白山气温直减率时空差异性研究. *地理学报*, 2016, 71(9): 1587-1595.
- [29] 韩新宇, 高露双, 秦莉, 庞荣荣, 刘鸣谦, 朱一泓, 田益雨, 张金. 林分密度对兴安落叶松径向生长-气候关系的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2024, 48(2): 182-190.
- [30] 周小东, 常顺利, 王冠正, 孙雪娇, 张毓涛, 李翔. 天山雪岭云杉径向生长响应气候变化的海拔分异. *林业科学*, 2024, 60(3): 45-56.
- [31] 霍晓英, 彭守璋, 任婧宇, 曹扬, 陈云明. 陕西省油松林生产力动态及对未来气候变化的响应. *应用生态学报*, 2018, 29(2): 412-420.
- [32] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456.
- [33] 向峻文, 张利平, 邓瑶, 余敦先, 张琴. 基于 CMIP6 的中国主要地区极端气温/降水模拟能力评估及未来情景预估. *武汉大学学报: 工学版*, 2021, 54(1): 46-57, 81.
- [34] 刘永和, 郭维栋, 冯锦明, 张可欣. 气象资料的统计降尺度方法综述. *地球科学进展*, 2011, 26(8): 837-847.
- [35] Zeng X M, Wei C F, Liu X H, Zhang L N. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) and Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) show high vulnerability and similar resilience to early-growing-season drought in the Helan Mountains, China. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105871.
- [36] Shishov V V, Tychkov I I, Popkova M I, Ilyin V A, Bryukhanova M V, Kirdyanov A V. VS-oscilloscope: a new tool to parameterize tree radial growth based on climate conditions. *Dendrochronologia*, 2016, 39: 42-50.
- [37] 姚岱均, 刘康, 惠俞翔, 王凯欣. 天水麦积山油松树轮宽度对气候变化的响应及其机制. *干旱区研究*, 2023, 40(1): 19-29.
- [38] Anchukaitis K J, Evans M N, Hughes M K, Vaganov E A. An interpreted language implementation of the Vaganov-Shashkin tree-ring proxy system model. *Dendrochronologia*, 2020, 60: 125677.
- [39] 于江珊, 宋沼鹏, 侯继华. 氮添加对天然油松林油松不同器官 N-P 分配策略的影响. *生态学报*, 2022, 42(2): 732-741.
- [40] 曹永昌, 杨瑞, 刘帅, 王紫泉, 和文祥, 耿增超. 秦岭典型林分夏秋两季根际与非根际土壤微生物群落结构. *生态学报*, 2017, 37(5): 1667-1676.
- [41] 陆斌, 张胜利, 李侃, 马国栋. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响. *生态学报*, 2014, 34(6): 1512-1519.
- [42] Zheng X F, Gao P X, Zhang S X. The distribution shifts of *Pinus armandii* and its response to temperature and precipitation in China. *PeerJ*, 2017, 5: e3807.
- [43] 王红桃, 包光. 秦岭及周边地区树木径向生长与气候因子的关系研究进展. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(1): 52-58.
- [44] 张琦, 苑丹阳, 王晓春. 大小龄红松木质部解剖特征的年龄效应及其对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2024, 44(11): 4876-4888.
- [45] Cabon A, Anderegg W R L. Large volcanic eruptions elucidate physiological controls of tree growth and photosynthesis. *Ecology Letters*, 2023, 26(2): 257-267.