

DOI: 10.20103/j.stxb.202406281510

刘清源, 史倩, 同小娟, 施曼华, 王音, 谭宁宁. 水热条件对华北落叶松人工林径向生长的影响. 生态学报, 2025, 45(10): 4900-4915.

Liu Q Y, Shi Q, Tong X J, Shi M H, Wang Y, Tan N N. The impact of hydrothermal conditions on the radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4900-4915.

水热条件对华北落叶松人工林径向生长的影响

刘清源, 史倩, 同小娟*, 施曼华, 王音, 谭宁宁

北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘要: 华北落叶松广泛分布于我国北方地区, 在水土保持、水源涵养与固碳释氧等方面具有重要的生态价值。在我国温带季风区采集了 11 个站点的华北落叶松人工林树芯, 建立了早材、晚材和整轮年表, 分析了树木径向生长对气候变化的敏感性, 探讨了气候变暖背景下不同地区华北落叶松径向生长对气候变化响应的差异。结果表明: 11 个站点的华北落叶松人工林标准年表样本代表性均大于 0.85, 平均敏感度大于 0.15, 表明各研究站点华北落叶松树轮生长受气候变化影响大, 包含较多的气候信息。上年 12 月—次年 3 月的温度和降水对华北落叶松径向生长具有促进作用, 多数站点夏季高温干旱抑制树木径向生长。不同地理位置的研究站点间, 树木径向生长与气候因子的相关性结果存在差异。水分条件是制约华北及中部地区各站点华北落叶松生长的主要因素。温度升高对西北各站树木径向生长的促进作用比降水更明显。白音敖包站树木径向生长受温度和降水的双重制约。气温突变后, 华北落叶松年表与温度的相关性由突变前的正相关转为负相关, 降水对树木径向生长的促进作用逐渐体现。不同气候因子水平下华北落叶松生长差异较小。最高温度低于 10 °C 时, 平均温度与最高温度升高对华北落叶松生长具有一定的促进作用。充足的水分条件能够使华北落叶松径向生长出现小幅度提升。气候轻度湿润 ($0.5 < \text{SPEI} < 1$) 为华北落叶松生长的最适干湿状态。平均温度低于 4 °C 时, 早材对平均气温升高的响应较晚材明显; 其余水平下二者对各气候因子的响应基本一致。

关键词: 华北落叶松; 径向生长; 早材; 晚材; 气候变化

The impact of hydrothermal conditions on the radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations

LIU Qingyuan, SHI Qian, TONG Xiaojuan*, SHI Manhua, WANG Yin, TAN Ningning

School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*, widely distributed across Northern China, possesses substantial ecological value for soil and water conservation, water source preservation, carbon sequestration and oxygen release. In this study, we collected tree cores of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations from 11 sites in 7 provinces. Chronologies of earlywood, latewood, and total ring were established to assess the responsiveness of radial growth to climatic factors, and discuss the differences between the responsiveness in different regions under the background of climate warming. The results showed that the expressed population signal (EPS) of the tree-ring samples of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* at all 11 sites was greater than 0.85, and the mean sensitivity (MS) was above 0.15, indicating that the radial growth at each site were greatly influenced by climate change and contained a considerable amount of climate information. Temperature and precipitation from December of the previous year to March of the current year promoted the growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*, while high temperatures and droughts in summer typically restricted growth at most sites. Research sites across various geographical locations exhibited varying outcomes. Water condition was

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2200401); 国家自然科学基金 (32271875, 31872703)

收稿日期: 2024-06-28; 网络出版日期: 2025-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongxj@bjfu.edu.cn

the predominant limiting factor affecting the growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* at sites in the central and northern regions. In the northwestern sites, the promoting effect of temperature increase on the radial growth was more obvious than that of precipitation. BY was simultaneously restricted by both temperature and precipitation. After the warming abrupt change, the correlation between temperature and the radial growth changed from a positive correlation to a negative correlation, and the promoting effect of precipitation on the growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* was gradually manifested. The growth differences under different levels of climatic factors fluctuate slightly. When the maximum temperature was under 10 °C, the increase in average temperature and maximum temperature had a promoting effect on the growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*. Sufficient water conditions can lead to a small increase in the radial growth. When $0.5 < \text{SPEI} < 1$, it was the most suitable dry and wet state for the growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*. When average temperature was under 4 °C, the response of earlywood to the increase in average temperature was more obvious than that of latewood; at other levels, the responses of both to each climatic factor were basically the same.

Key Words: *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations; radial growth; earlywood; latewood; climate change

近年来,极端气候与干旱事件呈多发频发态势^[1],对现有森林结构、功能及分布格局产生显著影响^[2-3]。已有学者发现,升温引起的干旱是森林大规模衰退的初始触发因素^[4]。在高温和干旱的共同胁迫下,树木气孔关闭,光合作用受到抑制。土壤水分减少导致冠层蒸腾超过根系水分吸收,抑制树木生长并降低森林固碳潜力^[5]。面对短期干旱,树木可释放自身储存的水分暂时缓冲干旱对维管系统的损害^[6]。长时间的干旱将导致组织脱水损伤,引发树木死亡。在我国北方地区,降水较少且年内分布不均,气温升高加剧了水分胁迫^[7],对树木生长造成明显的抑制作用,部分地区人工林已出现生长衰退甚至死亡现象^[8]。高温干旱已成为目前限制树木生长的重要因素^[9],未来这种现象可能持续存在并不断加剧。因此,探究当前气候背景下我国北方地区水热条件对树木径向生长的影响机制具有重要意义。

华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)是我国华北地区重要的速生用材树种^[10],也是北方山地森林植被恢复和森林资源培育的主要树种^[11]。目前,已有诸多学者针对华北落叶松人工林径向生长对气候变化的响应机制开展研究^[12-13]。相较其他树种,华北落叶松分布海拔较高,分布地温度相对较低,全球变暖会在一定程度上促进其径向生长^[14]。随着气温不断升高,温度对华北落叶松生长的促进作用逐渐消失。研究表明,5—7月的夏季高温已对华北落叶松径向生长表现出显著的抑制作用^[15]。同时,我国北方地区降水较少且主要为夏季降水,水分在华北落叶松整个生长期中的制约作用逐渐明显^[16]。贾存等^[17]研究得出,夏季降水对华北落叶松人工林径向生长有显著促进作用。华北落叶松分布广泛,不同地区华北落叶松生长的限制因子不同。任旭明等^[18]发现山西关帝山林区华北落叶松径向生长受气温和降水的共同影响。陈忠震等^[19]对河北龙头山林场华北落叶松研究指出,3、4月份降水是限制该地区华北落叶松生长的主要因子。在大兴安岭地区,梁慧敏等^[20]研究表明,该地区华北落叶松生长主要受气温及11月降水的影响。早材、晚材对气候因子的响应也存在差异。6月高温与9—10月高温分别对早材、晚材生长具有重要的促进作用;随着气候变暖,生长季前期降水对晚材生长的限制作用逐渐增强,而对早材的促进作用逐渐明显^[21]。目前针对华北落叶松径向生长对气候变化响应的研究多集中于某一个或某几个地区,缺乏地理跨度较大的站点对比研究,且不同气候区华北落叶松径向生长对气候变化的响应机制存在何种差异仍需进一步探讨。

本文在我国北方11个不同地理位置的华北落叶松人工林站点采集树芯,建立早晚材年轮宽度年表,探究树木径向生长对气候变化的响应机制,为进一步解析今后气候变化趋势下华北落叶松人工林生长状况及生产力预测提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的11个站点分别为:赛罕乌拉、白音敖包、旺业甸、桃山、东灵山、吉县、好地方、秦岭、叠叠沟、

西峡、太子山,其分布如图 1 所示。各研究站点地理坐标、海拔、年均温度、年最高温度、年最低温度、年均降水量及样地信息等详见表 1。

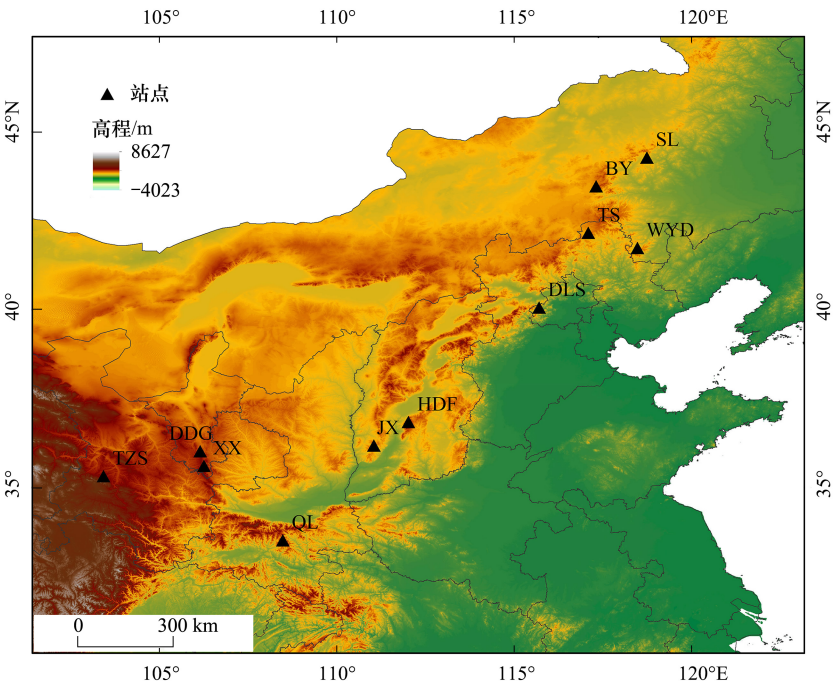


图 1 华北落叶松人工林站点位置

Fig.1 Locations of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* in this study

赛罕乌拉:SL;白音敖包:BY;旺业甸:WYD;桃山:TS;东灵山:DLS;好地方:HDF;吉县:JX;秦岭:QL;叠叠沟:DDG;西峡:XX;太子山:TZS;
Saihanwula: SL; Baiyinaobao: BY; Wangyedian: WYD; Taoshan: TS; Donglingshan: DLS; Haodifang: HDF; Jixian: JX; Qinling: QL;
Diediegou: DDG; Xixia: XX; Taizishan: TZS

表 1 各研究站点基本信息

Table 1 Basic information at each site

站点 Sites	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	年均温 Annual average temperature/ ℃	年最高温 Annual maximum temperature/ ℃	年最低温 Annual minimum temperature/ ℃	年均降水量 Annual precipitation/ mm	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	密度 Density/ (株/hm ²)
赛罕乌拉/SL	118°44′	44°13′	1181	4.3	31.3	-23	381	17.34	12.6	1424
白音敖包/BY	117°19′	43°25′	1469	3.3	30.8	-25.9	383	18.56	14.1	1301
旺业甸/WYD	118°28′	41°41′	1251	6.9	32.3	-21.6	427	29.96	16.4	373
桃山/TS	117°5′	42°6′	1488	5.4	31.7	-21.3	448	25.78	18.2	555
东灵山/DLS	115°42′	40°0′	1220	10.1	33.7	-15.3	469	17.34	13.6	1024
好地方/HDF	112°1′	36°47′	2212	11	33.2	-13.9	508	25.68	13.5	576
吉县/JX	111°3′	36°7′	1600	10.5	31.3	-13.1	549	19.42	11.2	1088
秦岭/QL	108°29′	33°28′	1995	12.5	32.1	-7.4	920	23.60	17.5	640
叠叠沟/DDG	106°9′	35°58′	2005	7.1	28.5	-17.1	457	14.90	12.4	789
西峡/XX	106°16′	35°33′	2194	5.8	25.7	-17.1	513	23.20	17.7	741
太子山/TZS	103°26′	35°16′	2381	5.9	27.7	-16.9	610	24.74	15.8	539

赛罕乌拉国家级自然保护区(SL)位于内蒙古自治区赤峰市巴林右旗,属温带大陆性气候,无霜期 100 d 左右。白音敖包(BY)位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗,属寒温带大陆性半干旱森林草原气候,5—9 月

降水占全年降水的 90%,无霜期 78 d 左右。旺业甸(WYD)位于内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗,属大陆性季风气候,降水多集中于 7—8 月。无霜期 117 d 左右。桃山林场(TS)位于河北省承德市围场县,属大陆性季风型山地气候,6—8 月降水占全年降水的 70%,无霜期 67—128 d。东灵山(DLS)位于北京市门头沟区,属暖温带大陆性季风气候,无霜期 195 d 左右。以上各站点位于小兴安岭南段至华北平原附近,年降水量为 400 mm 左右,除东灵山年均温达到 10 ℃ 外,其余站点年均温均在 3—7 ℃ 之间。

太岳山好地方林场(HDF)位于山西省长治市沁源县,降水多集中于 6—8 月,无霜期 125 d。蔡家川林场(JX)位于山西省临汾市吉县,属暖温带半干旱大陆性气候,无霜期 150 d。西北农林科技大学火地塘教学试验林场(QL)位于陕西省安康市宁陕县,属北亚热带温暖湿润气候区,无霜期 199 d。以上各站点年均温为 10—13 ℃,秦岭年降水量大于 900 mm,好地方与吉县年降水量为 500 mm 左右。

六盘山叠叠沟林场(DDG)位于宁夏回族自治区固原市原州区,气候类型为半干旱大陆性季风气候,降水集中在 7—9 月,无霜期 130 d。六盘山西峡林场(XX)位于宁夏回族自治区固原市泾源县,属暖温带半湿润气候,降水集中于 3—9 月,无霜期 100—130 d。太子山(TZS)位于甘肃省临夏回族自治州康乐县,属于温带大陆性季风气候。以上各站点位于我国西北地区,年均温 5—7 ℃,年降水量 400—600 mm 左右。

1.2 样品采集与年表建立

基于国际树木年轮数据库(International Tree-ring Data Bank, ITRDB)标准,于 2023 年 4—6 月分别在 11 个站点的华北落叶松人工林中设置 3 个 25 m×25 m 的样地,每个样地内进行每木检尺,选择受干扰较小、生长良好的 23 棵华北落叶松(包括 3 棵优势木),用生长锥在每株样木的胸径(1.3 m)处钻取树芯,南北和东西方向各采一根,用玻璃胶和树木创伤修复液将创伤口封住,防止虫蚁蛀食。将采集的树芯放入吸管内密封,记录各站点样地密度、树高、海拔、地理坐标等信息。

回到实验室后用胶带将树芯固定于定制的木槽中,置于通风处进行晾晒。用装有低目砂纸的打磨机进行粗磨,再用高目砂纸手工打磨。用 Lintab 6 年轮分析仪(Rinntech, Heidelberg, Germany)和 TASP-Win 软件测定年轮宽度,测定精度为 0.01 mm。进行交叉定年与树轮宽度测量后,得到树轮每年生长量。本文采用 R 语言的“dplR 包”建立华北落叶松人工林年表,使用“dplR 包”中的修正的负指数函数及样条函数去除树木本身的遗传因素和林分密度以及干扰竞争产生的生长趋势(简称去趋势),并对去趋势的序列以双重平均法合成标准年表(STD)。

1.3 统计分析

本研究使用的气象数据来源于各站点附近的国家标准气象站,包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、相对湿度、日照时间、风速等气候信息,计算得到各站点标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)。同时,考虑到气候因子对树木径向生长存在“滞后效应”,本研究选取研究时间序列内,上一年 6 月至当年 12 月的逐月平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度和 SPEI 共 6 个气象指标,利用 SPSS 软件进行皮尔逊相关性分析,探究气候因子对华北落叶松人工林径向生长的影响,利用 OriginPro 2024 软件进行绘图。

基于各站点平均气温数据,采用 Mann-Kendall 法进行突变检验,确定各站点发生气温突变的具体年份。本研究使用 Python 程序软件进行滑动分析,考虑到滞后效应,气象数据选取范围为上一年 10 月至当年 9 月,在突变年份前后各选取 15 a,滑动窗口共计 31 a,滑动步长为 1 a,进行树轮宽度年表与气候要素的滑动相关分析,以确定气温突变前后华北落叶松径向生长对气候因子的响应差异。

2 结果与分析

2.1 气候因子的变化

各站点年均温均在 0 ℃ 以上,且年际变化趋势具有较高的一致性(图 2)。除白音敖包站外,各站点年最高温度均在 10 ℃ 以上。赛罕乌拉站、白音敖包站、桃山站最低温度在 0 ℃ 以下,其余站点均接近或高于 0 ℃。

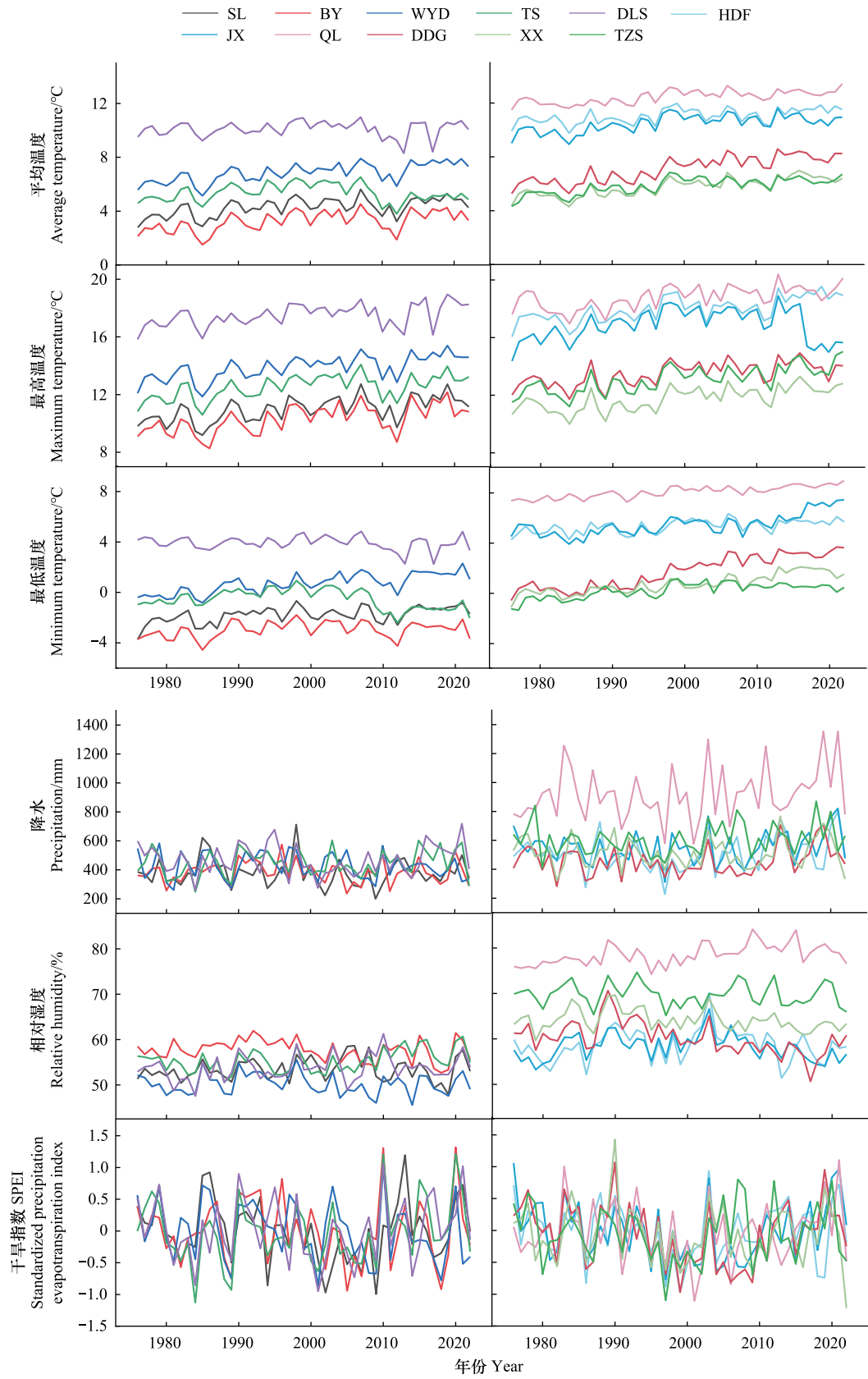


图2 各研究站点平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、干旱指数的年变化

Fig.2 The trend of annual average temperature, annual maximum temperature, annual minimum temperature, annual precipitation, annual relative humidity, and annual SPEI at each site

各站点平均温度、最高温度与最低温度呈现逐年上升趋势,变化趋势随地理分区的不同而产生差异。赛罕乌拉站、白音敖包站、旺业甸站、桃山站和东灵山站等位于华北平原附近的站点,温度的年际变化趋势与其他站点不同,赛罕乌拉等站点在 2007—2012 年温度出现大幅下降后继续上升,而秦岭等站点未出现该趋势,保持平稳上升。

各站点水分条件存在差异。秦岭站年降水量多大于 800 mm,高于其他站点;赛罕乌拉站与白音敖包站年降水量最少,基本少于 400 mm;其余站点年均降水量在 400—600 mm 之间。秦岭站相对湿度最大,各年份基本大于 75%;太子山站次之,为 70%;西峡站与叠叠沟站相对湿度分别为 64%与 60%,其余站点相对湿度低于 60%。赛罕乌拉站、白音敖包站、旺业甸站、东灵山站、吉县站、叠叠沟站 SPEI 介于轻度干旱和中度湿润之间 ($-1 < \text{SPEI} < 1.5$);桃山站、秦岭站、西峡站 SPEI 介于中度干旱和中度湿润之间 ($-1.5 < \text{SPEI} < 1.5$);好地方站 SPEI 介于轻度干旱和轻度湿润中间 ($-1 < \text{SPEI} < 1$);太子山站 SPEI 介于中度干旱和轻度湿润之间 ($-1.5 < \text{SPEI} < 1$)。11 个研究站点中,均无极端干旱或极端湿润现象,研究时间序列内水分收支相对平衡。

2.2 华北落叶松人工林年表特征

年表统计特征包括样本总代表性 (EPS)、平均敏感度 (MS)、信噪比 (SNR)、样本间平均相关系数 (RBAR)、一阶自相关系数 (AR1) (表 2)。EPS 反映了年表结果的可靠性,11 个站点年表 EPS 均在 0.85 以上,说明样本具有区域代表性,适用于对气候因子的响应研究。平均敏感度用来表征所建立年表包含气候信息的多少^[22],各站点年表平均敏感度均在 0.15 以上,表明华北落叶松的径向生长包含较多气候信息且受气候因子影响明显。样本间平均相关系数与一阶自相关系数越大,代表气候因子对年轮生长的影响越大^[23]。11 个站点 RBAR 为 0.119—0.491,AR1 为 0.268—0.797。各站点信噪比均处于较高水平,最高达 63.81,表明各年表均能反映出气候的高频变化。各站点早材年表的信噪比、样本间平均相关系数普遍较晚材年表大,说明早材对气候因子更敏感。

11 个站点的华北落叶松年表指数存在差异 (图 3)。旺业甸站、桃山站、好地方站华北落叶松年表指数波动频率高于其他站点,赛罕乌拉站、桃山站、叠叠沟站的波动幅度大于其他站点。叠叠沟站与太子山站的年表指数变化趋势相似,均呈现上升—下降—上升的趋势,且随年份变化趋势明显。旺业甸站、吉县站、西峡站、好地方站的年表指数随年份变化趋势不明显,其他站点年表指数则呈现出明显的时间差异。

2.3 华北落叶松径向生长对气候因子的响应

2.3.1 全生长阶段气候因子对径向生长的影响

各站点华北落叶松径向生长主要受上年生长季中后期与当年生长季水热条件的影响 (图 4)。旺业甸站与白音敖包站华北落叶松径向生长分别与当年 2、3 月温度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。东灵山站 ($P < 0.05$)、西峡站 ($P < 0.01$)、太子山站 ($P < 0.01$) 华北落叶松径向生长与上年及当年 12 月温度呈正相关关系。夏秋温度对赛罕乌拉站、东灵山站、吉县站华北落叶松径向生长存在显著抑制作用 ($P < 0.05$),对叠叠沟站和太子山站树木生长则有显著促进作用 ($P < 0.05$)。

相比热量条件,水分条件对华北落叶松径向生长的影响更密集且显著。上、当年夏秋及当年春季水分条件对华北落叶松生长影响显著。赛罕乌拉站、白音敖包站、旺业甸站、东灵山站等位于我国华北地区附近的站点,树木径向生长与当年生长季前中期水分条件呈正相关关系,而好地方站、吉县站及秦岭站等位于我国中部地区的站点则与水分条件呈负相关关系,水分是上述站点华北落叶松径向生长的主要限制因素。太子山站华北落叶松径向生长与水分因子的相关关系较弱,仅与当年 9 月降水呈显著负相关 ($P < 0.05$)。11 个站点中,叠叠沟站华北落叶松径向生长与气候因子的相关关系最为显著,与上年及当年夏秋温度呈显著正相关 ($P < 0.05$),与同期 SPEI 呈显著或极显著负相关。

各站点华北落叶松早材年表受当年生长季前中期温度、上年及当年生长季中后期相对湿度和 SPEI 影响较大 (图 5)。在西北与东北地区,早材生长主要受温度制约,而在华北与中部地区则受水分影响大。白音敖包站、旺业甸站、吉县站与叠叠沟站 ($P < 0.01$) 早材生长与当年春夏温度呈显著正相关 ($P < 0.05$),秦岭站则与

表 2 华北落叶松标准年表特征值统计
Table 2 Statistics of standard tree ring-width chronologies

站点 Sites	类别 Type	时间序列 Time series	样芯数 Number of plants	树龄/a Tree age	样本总代表性 Expressed population signal	平均敏感度 Mean sensitivity	信噪比 Signal to noise ratio	样本间平均 相关系数 Mean inter-series correlation	一阶自 相关系数 First order autocorrelation
赛罕乌拉 SL	RW	1983—2022	119	26—40	0.985	0.395	63.810	0.465	0.667
	EW	1983—2022		26—40	0.982	0.409	54.978	0.426	0.656
	LW	1983—2022		26—40	0.977	0.525	42.657	0.360	0.656
白音敖包 BY	RW	1982—2022	107	27—41	0.968	0.32	30.274	0.491	0.668
	EW	1982—2022		27—41	0.965	0.347	27.571	0.462	0.653
	LW	1982—2022		27—41	0.954	0.389	20.889	0.271	0.381
旺业甸 WYD	RW	1964—2022	111	41—59	0.927	0.437	12.724	0.190	0.620
	EW	1964—2022		41—59	0.905	0.519	9.549	0.147	0.590
	LW	1964—2022		41—59	0.929	0.531	13.176	0.197	0.437
桃山林场 TS	RW	1971—2022	133	35—52	0.977	0.412	42.101	0.287	0.657
	EW	1972—2022		34—51	0.975	0.468	38.84	0.267	0.639
	LW	1971—2022		35—52	0.964	0.378	27.051	0.192	0.402
东灵山 DLS	RW	1977—2022	129	27—46	0.900	0.282	8.985	0.179	0.729
	EW	1978—2022		26—45	0.882	0.537	7.480	0.162	0.594
	LW	1977—2022		27—46	0.879	0.297	7.299	0.155	0.666
好地方 HDF	RW	1976—2022	60	38—47	0.919	0.375	11.414	0.239	0.690
	EW	1977—2022		38—46	0.895	0.425	8.494	0.205	0.647
	LW	1976—2022		38—47	0.878	0.365	7.218	0.189	0.540
吉县 JX	RW	1986—2022	112	22—37	0.892	0.382	8.278	0.125	0.482
	EW	1986—2022		22—37	0.895	0.386	8.494	0.132	0.464
	LW	1986—2022		22—37	0.851	0.429	5.689	0.088	0.268
秦岭 QL	RW	1967—2022	122	35—56	0.930	0.265	13.346	0.122	0.797
	EW	1967—2022		34—56	0.911	0.348	10.233	0.263	0.774
	LW	1967—2022		35—56	0.933	0.394	13.958	0.119	0.610
叠叠沟 DDG	RW	1986—2022	106	21—37	0.889	0.351	8.043	0.339	0.636
	EW	1986—2022		21—37	0.985	0.419	8.559	0.380	0.600
	LW	1986—2022		21—37	0.855	0.512	5.920	0.263	0.453
西峡 XX	RW	1981—2022	117	26—42	0.953	0.455	20.279	0.315	0.603
	EW	1982—2022		25—41	0.943	0.465	16.396	0.258	0.525
	LW	1981—2022		26—42	0.958	0.370	22.988	0.345	0.508
太子山 TZS	RW	1980—2022	106	26—43	0.897	0.554	8.735	0.180	0.669
	EW	1980—2022		26—43	0.898	0.662	8.799	0.164	0.585
	LW	1980—2022		26—43	0.900	0.569	9.038	0.166	0.517

RW: 整轮; EW: 早材; LW: 晚材。RW: Total ring width; EW: Earlywood width; LW: Latewood width

当年 6 月平均温度呈显著负相关($P<0.05$)。上年夏秋温度也对早材生长存在影响,在赛罕乌拉、旺业甸、桃山等站,上年夏秋高温对早材生长存在抑制作用,而叠叠沟站则与其呈正相关($P<0.05$)。各站点早材与水分因子的相关关系同整轮类似,赛罕乌拉站早材生长与当年 3 月降水呈显著正相关($P<0.05$),白音敖包站、东灵山站、好地方站与当年秋季相对湿度及 SPEI 呈显著正相关($P<0.05$),且均与上年生长季中后期水分条件呈显著正相关($P<0.05$)。秦岭站早材生长与上年 12 月相对湿度($P<0.05$)、吉县站与当年 3 月 SPEI 均呈显著负相关关系($P<0.05$)。

各站点晚材年表主要受上年夏秋、当年生长季开始前及当年生长季中后期气候因子的影响(图 6)。相比

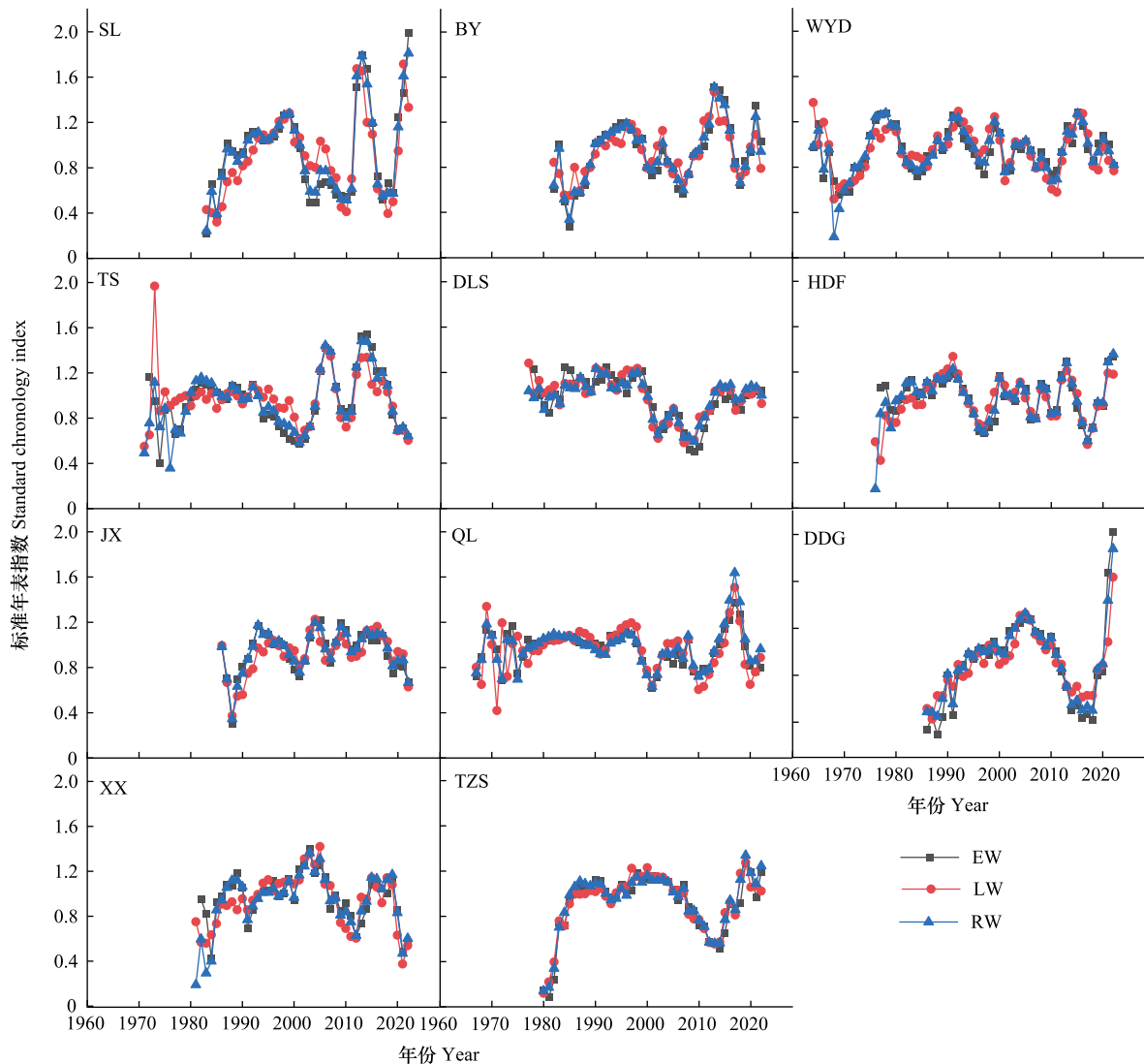


图3 各站点华北落叶松标准年表指数

Fig.3 The standard chronology index at different sites

RW: 整轮; EW: 早材; LW: 晚材

早材,晚材与气候因子间的相关关系更加复杂,生长季后期气候因子对晚材的影响大。上年夏秋高温对晚材生长的抑制作用较早材明显,旺业甸站、东灵山站晚材与上年6、7、9月温度呈负相关($P<0.05$)。3、4月温度对晚材生长有促进作用。冬季温度对晚材生长的促进作用较早材明显,旺业甸站与上年12月温度($P<0.05$),东灵山站($P<0.05$)、西峡站($P<0.05$)、太子山站($P<0.01$)与当年12月温度均呈显著正相关。不同站点晚材对水分条件响应的差异仍然存在。华北地区附近各站点与当年3、4月,上年及当年生长季中后期水分条件呈显著或极显著正相关;吉县站、太子山站与叠叠沟站则与其呈负相关($P<0.05$)。

2.3.2 不同生长阶段径向生长对夏季气候因子的响应

华北落叶松径向生长对气候因子响应结果表明(图4—6),夏季气候因子对华北落叶松生长的影响较为强烈。参考华北落叶松龄级划分标准,对处于不同生长阶段的华北落叶松与上年及当年夏季(6—8月)气候因子做相关分析(图7—8)。结果表明,夏季温度对生长前期华北落叶松径向生长有促进作用,上年夏季高温对生长中后期的华北落叶松径向生长的抑制作用明显。当年夏季降水对生长后期华北落叶松生长存在抑制作用。夏季相对湿度及SPEI对生长中期华北落叶松生长有促进作用,对生长前期及生长后期华北落叶松生

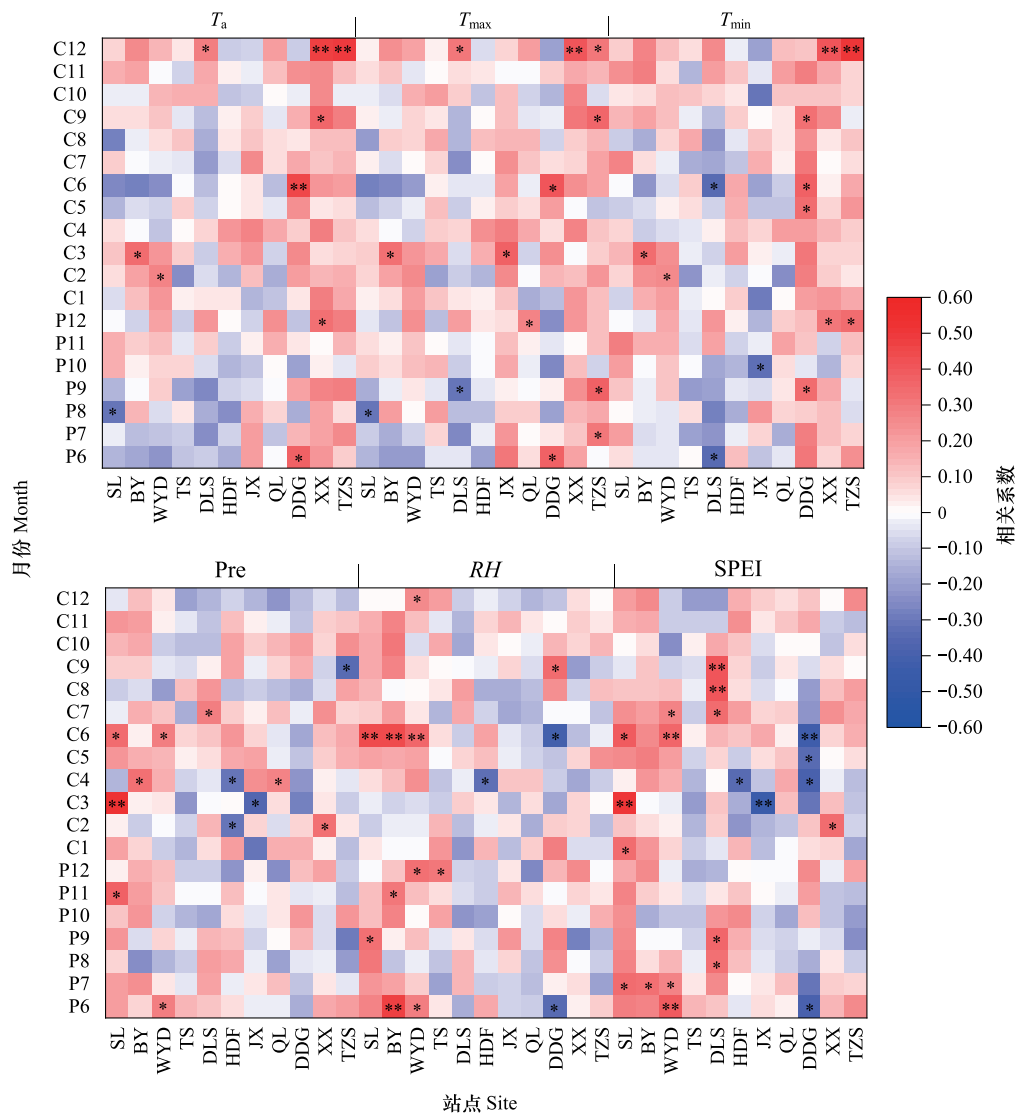


图4 整轮年表对平均温度(T_a)、最高温度(T_{max})、最低温度(T_{min})、降水量(Pre)、相对湿度(RH)、干旱指数(SPEI)响应的相关系数

Fig.4 Correlation between total ring width and annual average temperature (T_a), annual maximum temperature (T_{max}), annual minimum temperature (T_{min}), annual precipitation (Pre), annual relative humidity (RH), and annual SPEI

“*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$; P: 上年; C: 当年

长作用不明显。当年夏季水分条件对华北落叶松生长的影响较上年夏季明显。

2.4 气温突变前后径向生长对气候因子响应的差异

为探究华北落叶松人工林径向生长对气温突变的响应,选取旺业甸站、东灵山站、好地方站、秦岭站与太子山站的整轮年表与气候因子进行滑动窗口为 31 a 的滑动分析,其他各站林龄不满足构建 31 a 的滑动窗口,故不做选取。结果表明,华北落叶松径向生长与水热条件的相关关系在气温突变前后存在差异(图 9)。温度与华北落叶松年表的相关性由突变前的正相关转为突变后的以负相关为主,但冬季高温对华北落叶松生长的促进作用始终存在;降水对华北落叶松生长的促进作用逐渐体现,各站点年表与降水间的滑动相关由不相关转为正相关,且随温度升高正响应程度逐渐增加。在地理位置及月份差异上,气温突变后,升温对华北平原附近树木生长的抑制作用尤为显著,且与同期降水的相关性相反。位于西北地区的太子山站,夏季高温对树木生长的抑制作用未在突变后立刻体现,而是在一段时间后逐渐凸显,即升温对树木生长具有一定的滞后效应。

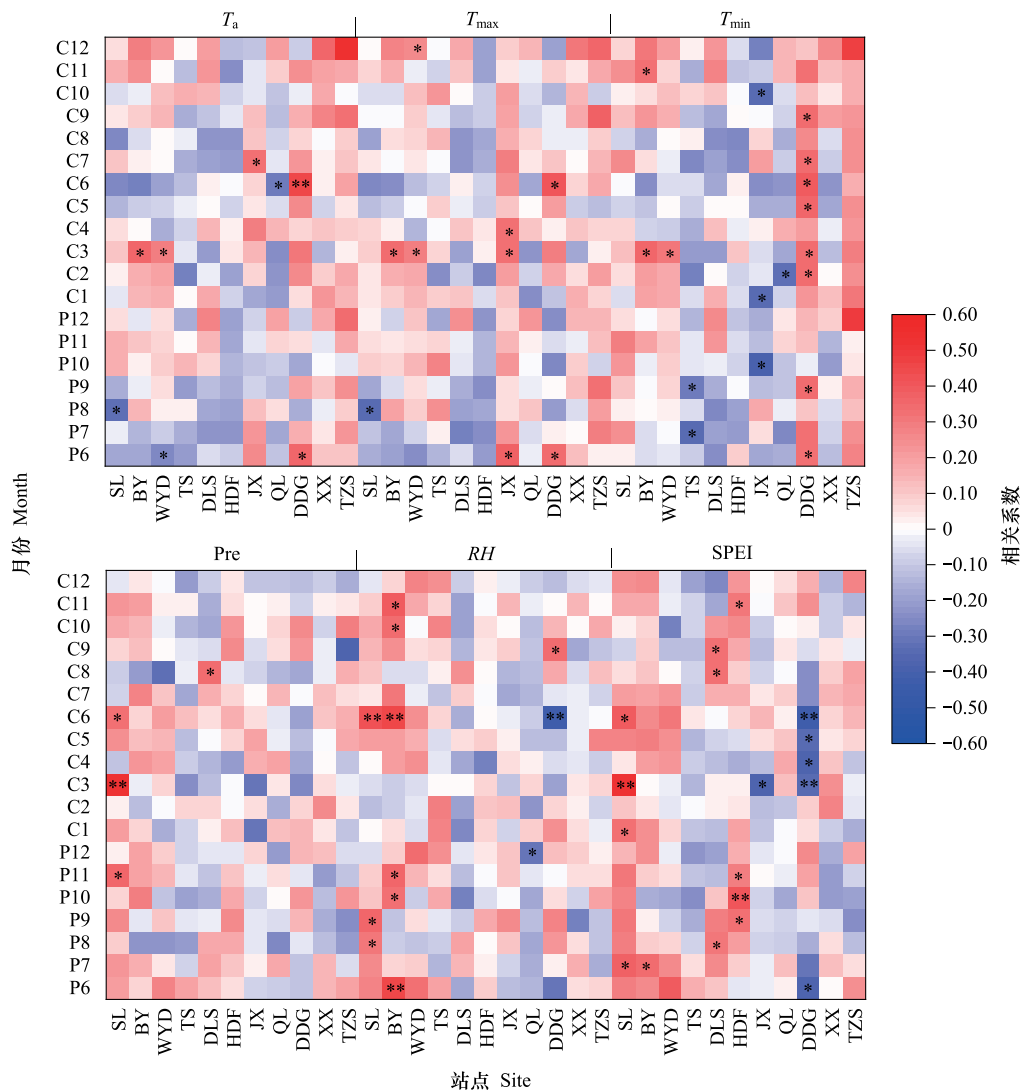


图5 早材年表对平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、干旱指数响应的相关系数

Fig.5 Correlation between earlywood width and annual average temperature, annual maximum temperature, annual minimum temperature, annual precipitation, annual relative humidity, and annual SPEI

2.5 不同气候因子水平下华北落叶松人工林年表指数的差异

为进一步探究华北落叶松径向生长对气候因子的响应,本研究将 11 个站点的华北落叶松进行整合分析。结合各站点平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、SPEI、站点类型及海拔进行主成分分析,结果表明,6 项气候因子的累积方差贡献率达 99.40%,因此进行整合分析时不再考虑站点地理位置及海拔对华北落叶松径向生长产生的影响。运用聚类分析将各气候因子分段,对比不同水平下华北落叶松年表的差异(图 10)。结果表明,不同气候因子水平下华北落叶松生长差异较小。最高温度低于 10 °C 时,温度升高对华北落叶松生长具有一定的促进作用。充足的水分有利于华北落叶松生长,当降水量达到 800—1400 mm 或 SPEI 值为 -1—1 时,华北落叶松径向生长出现小幅度提升。SPEI 值为 0.5—1,即气候轻度湿润时,此时为华北落叶松生长的最适干湿状态。平均温度低于 4 °C 时,早材对平均气温升高的响应较晚材明显;其余气候因子水平下,早材与晚材对各气候因子的响应基本一致。

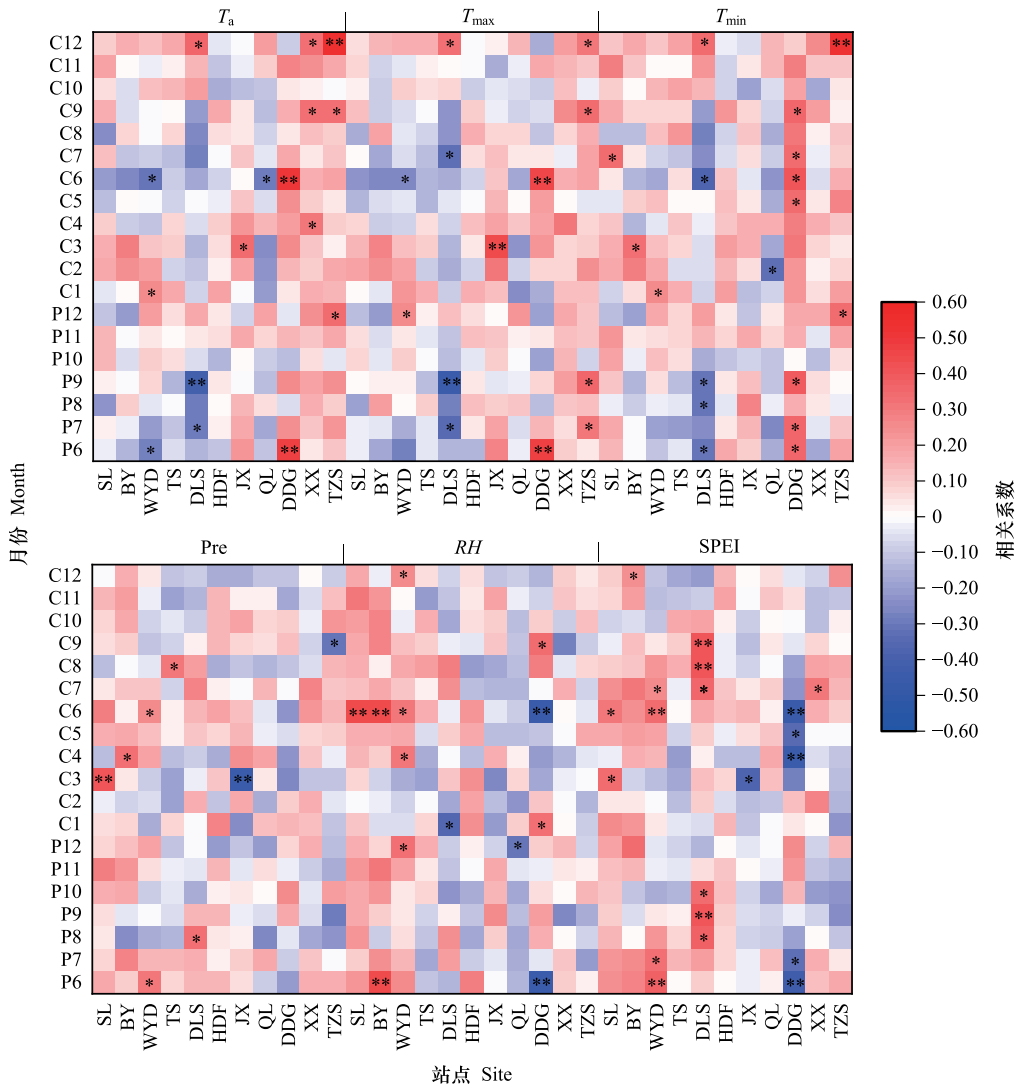


图6 晚材年表对平均温度、最高温度、最低温度、降水量、相对湿度、干旱指数响应的相关系数

Fig.6 Correlation between latewood width and annual average temperature, annual maximum temperature, annual minimum temperature, annual precipitation, annual relative humidity, and annual SPEI

3 讨论

3.1 树木径向生长对气候因子的响应

11 个研究站点的华北落叶松径向生长均与生长季前期平均温度、最高温度、最低温度呈正相关关系。生长季前期,林木从休眠状态中恢复,温度升高能够刺激形成层细胞分裂,促进林木生长^[24]。升温带来的早春现象对华北落叶松生长的促进作用也可用此解释。生长季中期,大部分站点华北落叶松径向生长对温度变化的响应不明显,说明夏季温度对北方森林径向生长不再呈现单一的促进作用^[25–26],结合滑动分析结果,高温导致的干旱已成为目前树木生长的主要限制因素^[27–28]。高温导致叶片气孔关闭,林木的蒸腾作用与光合作用受到阻碍^[29–30],林木生长受到抑制。各站点研究结果均表明冬季高温多雨及早春现象对树木径向生长有显著促进作用,这与其他学者的研究结果相似^[31]。上年夏秋高温对树木生长存在抑制作用^[32],这在赛罕乌拉站、桃山站、旺业甸站、东灵山站、吉县站等多个研究站点中均有体现。高温通常伴随高蒸发蒸腾速率,导致土壤水分供应不足^[33]。且以上各站点降水多集中于5—8月,生长季结束后的冬季至下一年春季降水较少,

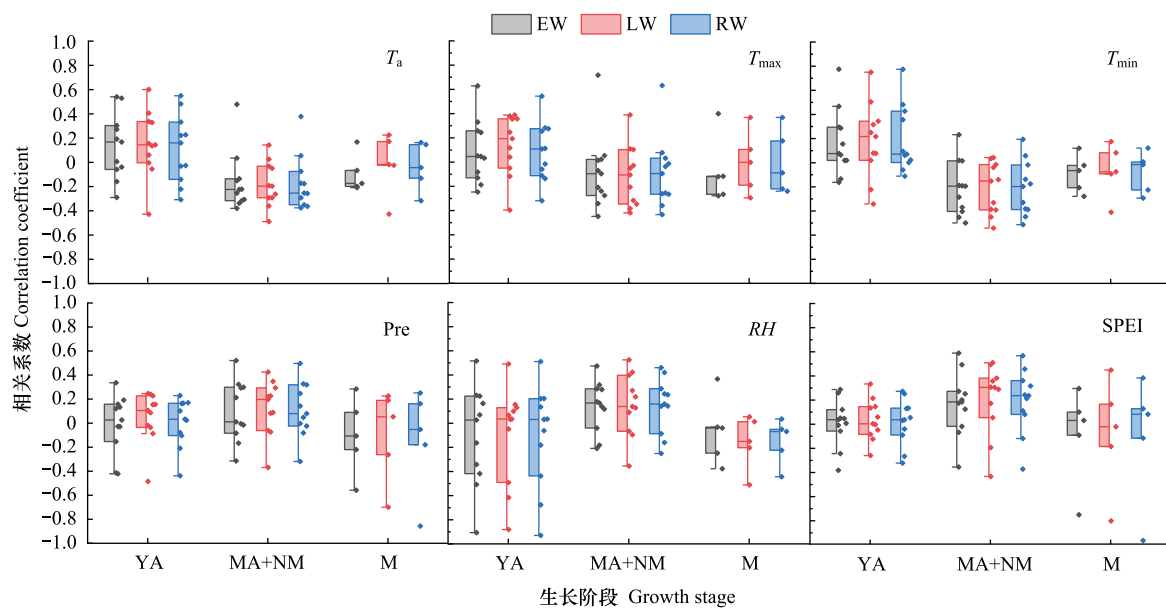


图7 华北落叶松标准年表对上年夏季(6—8月)气候因子的响应

Fig.7 Response of standard chronology of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* to previous summer (June to August)'s climatic factors

幼龄期:YA;中龄期:MA;近熟期:NM;成熟期:M

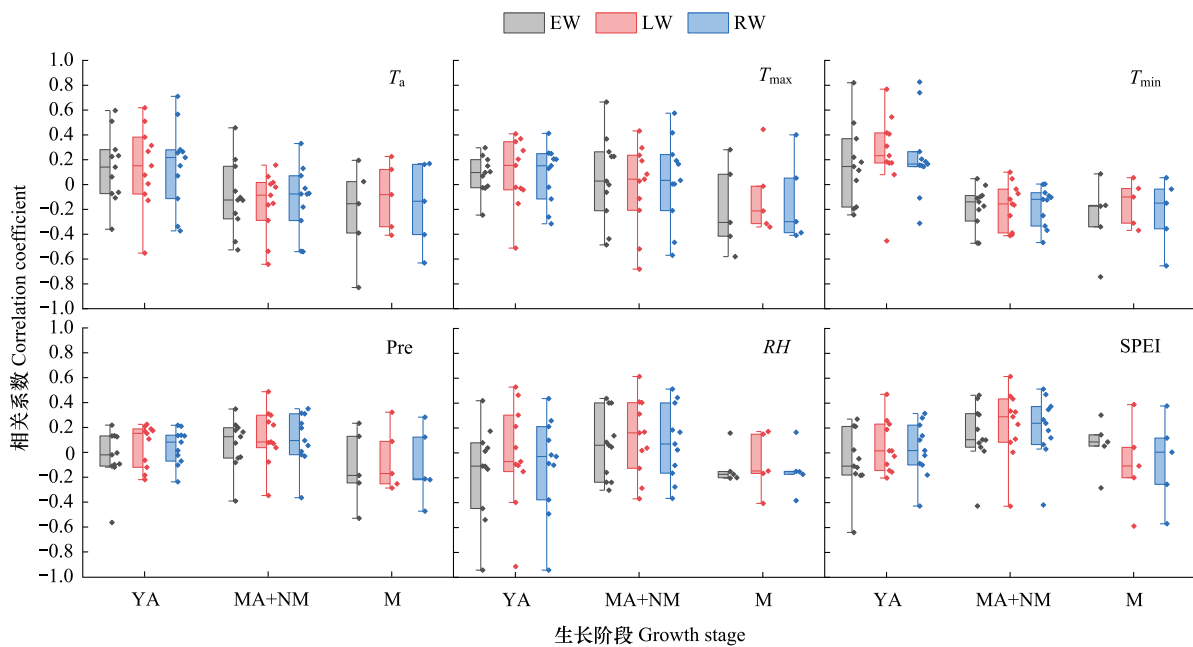


图8 华北落叶松标准年表对当年夏季(6—8月)气候因子的响应

Fig.8 Response of standard chronology index of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* to current summer (June to August)'s climatic factors

导致这种水分胁迫可能会持续到下一年雨季,影响第二年树木生长。

早、晚材对气候变化的响应存在差异。早材对低温条件下的升温现象具有更高的敏感性^[34],早材形成于生长季早期,此时的气候条件对树木生长的影响较大,在决定生长季开始的同时,也直接影响到早材的形成和发育。晚材形成于生长季中后期,此时树木各项生命活动减慢,水分利用效率降低^[35],充足的水热条件能够刺激木质部继续生长,推迟生长季结束,进而促进晚材生长。相较晚材,早材与整轮对气候变化的响应机制更

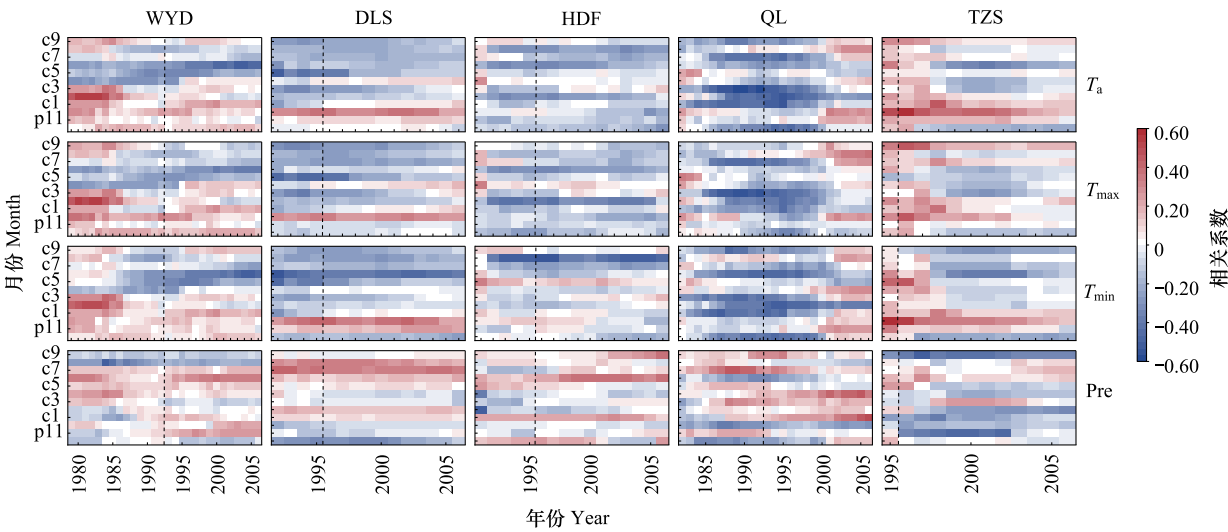


图9 华北落叶松标准年表与气候因子的滑动相关分析

Fig.9 Smoothing correlation analysis of the standard chronology and climatic factors

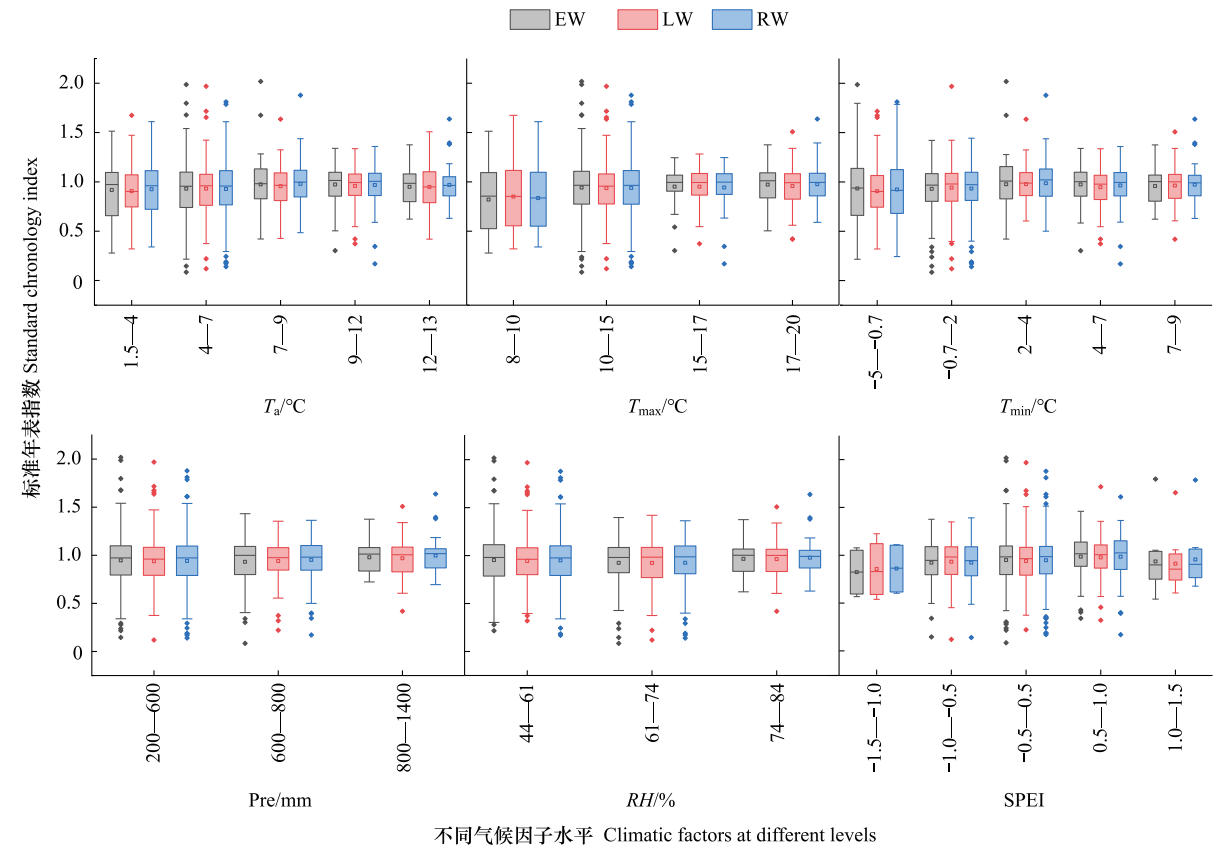


图10 不同气候因子水平下华北落叶松标准年表的差异

Fig.10 Differences between standard chronology of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*

为相似。由于早材生长速度快,晚材生长相对缓慢,在气候条件发生变化时,早材可能会更快地做出响应^[36]。

3.2 不同站点树木径向生长对气候因子响应的差异

不同地理位置的研究站点之间研究结果存在明显差异。温度与华北落叶松径向生长的关系自东向西呈现出正相关-负相关-正相关的变化趋势,降水则呈现显著正相关-显著负相关-相关关系减弱的趋势;地理位置

较近的站点之间也存在对气候因子响应机制的区别。地处我国华北至东北地区的各站点纬度高,热量条件差,尤其白音敖包站位于小兴安岭最南端,冬季低温现象常见,研究时间序列内极端低温低至 $-36.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,热量条件不足,因此冬季最低温度升高对这些站点的树木生长具有极为重要的促进作用。东灵山站、吉县站、秦岭站等地热量条件适宜,温度并不是限制该地区华北落叶松生长的主要因素。最低温升高造成的干旱限制了形成层细胞活动和增大,导致华北落叶松生长速率减慢^[37]。西峡站与太子山站华北落叶松径向生长与当年秋冬温度间表现出比其他站点更显著的正相关关系,结合月均降水与月均相对湿度数据,这两个站点气候湿润且秋冬季水分充足,湿润条件下生长季末期高温会延缓生长季结束,促进林木径向生长^[38]。同样的原理可以解释太子山站的滑动分析结果,该站海拔较高,热量条件较其他站点差,气温突变后,升温既直接带来热量,增加积温,延长树木生长季,同时加速积雪融化,为林木提供生长季前期各项生理功能的必需水分。因此气温突变后,太子山站树木生长仍在一段时间内保持与温度间的正相关关系。

降水对华北落叶松径向生长的影响较温度复杂。赛罕乌拉、白音敖包、东灵山、桃山等位于我国华北地区附近各站点,春旱现象严重且年内降水分布不均,春夏多雨能够极大程度上缓解林木受到的干旱胁迫^[39]。6—7月是华北落叶松径向生长的关键时期,超过 $2/3$ 的径向生长发生在这一时段^[40],此时林木生命活动旺盛,充足的降水提供了林木快速生长所需的水分。在好地方站与吉县站,3—4月降水对该地林木生长体现出显著的抑制作用。好地方站地处山区,海拔较高,林木进入生长季的时间较其他站点晚,3、4月温度低,林木尚未进入生长旺盛期,生长速率仍相对缓慢,所需水分少^[41]。此时降水增多,可能会超出林木所需水分的阈值范围,影响根系呼吸,抑制林木生长^[42];而吉县站海拔低,生长季初期过多的阴雨天会导致日照时间缩短,影响林木光合作用,限制林木径向生长。

在西北地区叠叠沟、西峡和太子山站,树木径向生长与水分条件的关系各不相同。叠叠沟站与西峡站的差异可能是由于二者气候类型的不同,西峡站属于半湿润气候而叠叠沟站属于半干旱气候,二者在降水及相对湿度上的差异明显。在半湿润区,林木很少受到水分制约的影响,水分运输以高效为主^[43];而在半干旱区,林木生长受水分制约大,树木通过减少气孔打开时间或采用小而密的管胞等策略应对水分不足^[44],此时林木运输水分以安全为主,不再追求高效,而是采取多种措施降低木质部栓塞风险。同时,叠叠沟站年内降水比西峡站更集中,导致林木在更长时间内都面临少雨现象。因此当夏季降水增加时,林木无法在短期内提高水分运输效率,过多的水分积压在土壤中,导致土壤通气不良,抑制根系呼吸,在研究结果上表现为树木径向生长与当年4—6月相对湿度及SPEI的负相关关系。太子山站树木生长与水分的相关关系不明显,仅与当年9月相对湿度呈显著负相关。这可能是因为该站相对湿度在9月份达到一年中的最大值,为82%左右,此时树木生长速率减慢,消耗水分较生长旺盛期少;同时生长季末期温度低,水分蒸发慢,土壤水分过剩导致养分流失,无法为树木冬季生命活动提供充足的养分^[45]。结合同期树木生长对温度的响应机制,可充分体现出温度与降水对其产生的综合作用,生长季末期温度升高,延长树木形成层的活动时间^[46];同时高温促进土壤水分蒸发,减轻了由于降水过多和相对湿度过大引发的抑制作用。

4 结论

11个研究站点华北落叶松人工林径向生长对气候因子的响应存在一定的相似性,但也随地理位置的不同发生改变。在华北及中部地区,水分条件是限制各站点华北落叶松生长的主要制约因素,在叠叠沟站、太子山站和吉县站,温度升高对华北落叶松的径向生长带来的促进作用比降水更明显。白音敖包站受温度和降水的双重制约。气温突变后,温度与华北落叶松年表的相关性由正相关转为负相关,降水对华北落叶松生长的促进作用逐渐体现。不同气候因子水平下华北落叶松生长差异较小。最高温度低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度升高对华北落叶松生长具有一定的促进作用。降水量达到800—1400 mm或SPEI值为 -1 — 1 时,华北落叶松径向生长出现小幅度提升。相比其他干湿条件,气候轻度湿润($0.5 < \text{SPEI} < 1$)时更利于华北落叶松生长。平均温度低于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,早材对平均气温升高的响应较晚材明显,其余气候因子水平下早材和晚材对各气候因子的响应基

本一致。

在未来气候不断变暖和干旱进一步加剧的背景下,制定我国北方地区华北落叶松人工林的经营模式及抚育措施时,需充分考虑温度、降水及林分立地条件等因素,开展合理规划经营,最大程度保证林分的正常生长,提高林分生产力。

参考文献 (References):

- [1] Yang R Q, Fu P L, Fan Z X, Panthi S, Gao J, Niu Y, Li Z S, Bräuning A. Growth-climate sensitivity of two pine species shows species-specific changes along temperature and moisture gradients in southwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 318: 108907.
- [2] Luo Y, Chen H Y H, McIntire E J B, Andison D W. Divergent temporal trends of net biomass change in western Canadian boreal forests. *Journal of Ecology*, 2019, 107(1): 69-78.
- [3] Seidl R, Honkaniemi J, Aakala T, Aleinikov A, Angelstam P, Bouchard M, Boulanger Y, De Grandpré L, Gauthier S, Hansen W D, Jepsen J U, Jögi K, Kneeshaw D D, Kuuluvainen T, Lisitsyna O, Makoto K, Mori A S, Pureswaran D S, Shorohova E, Shubnitsina E, Taylor A R, Vladimirova N, Vodde F, Senf C. Globally consistent climate sensitivity of natural disturbances across boreal and temperate forest ecosystems. *Ecography*, 2020, 43(7): 967-978.
- [4] Zhou F F, Dong Z P, Fang K Y, Cheng D L, Tang H, Ou T H, Zhang F, Chen D L. Summer heat induced the decline of *Pinus taiwanensis* forests at its southern limit in humid Subtropical China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 350: 109974.
- [5] Lyu L X, Zhang Q B, Pellatt M G, Büntgen U, Li M H, Cherubini P. Drought limitation on tree growth at the Northern Hemisphere's highest tree line. *Dendrochronologia*, 2019, 53: 40-47.
- [6] Meinzer F C, Johnson D M, Lachenbruch B, McCulloh K A, Woodruff D R. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology*, 2009, 23(5): 922-930.
- [7] Wu C Y, Chen D S, Sun X M, Zhang S G. Influence of altitude and tree class on climate-growth relationships in a larch plantation in subtropical China. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(6): 1869-1880.
- [8] 赵鹏武, 管立娟, 刘兵兵, 周梅, 舒洋. 我国半干旱区东段森林动态研究现状及展望. *世界林业研究*, 2021, 34(2): 74-79.
- [9] Kunert N, Hajek P, Hietz P, Morris H, Rosner S, Tholen D. Summer temperatures reach the thermal tolerance threshold of photosynthetic decline in temperate conifers. *Plant Biology*, 2021, 24(7): 1254-1261.
- [10] 马长明, 赵辉, 牟洪香, 刘炳响. 燕山山地华北落叶松人工林碳密度及分配特征. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 208-214.
- [11] 李淑辉, 梁芳, 郭晋平. 关帝山林区华北落叶松人工林抚育间伐对林下植被的影响. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2012, 32(3): 256-260.
- [12] 王巍樾, 万艳芳, 白雨诗, 王冬梅, 于澎涛, 王彦辉, 刘亚玲, 李宗善. 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. *生态学报*, 2024, 44(16): 7290-7300.
- [13] Zhang Y, Liao J L, Xu C, Du M C, Zhang X L. Optimizing variables selection of random forest to predict radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* in temperate regions. *Forest Ecology and Management*, 2024, 569: 122159.
- [14] 梁逸娟, 王传宽, 臧妙涵, 上官虹玉, 刘逸潇, 全奎奎. 落叶松径向生长和生物量分配对气候变暖的响应. *植物生态学报*, 2024, 48(4): 459-468.
- [15] 王小雪, 王恒, 张俊飞, 冯泽军, 安利伟, 郭明明. 塞罕坝林区华北落叶松径向生长对气候变化的响应. *林业与生态科学*, 2022, 37(2): 192-197.
- [16] 熊千志, 杜恩在, 薛峰, 李文卿, 周子建, 赵守栋, 江源. 塞罕坝地区人工针叶林径向生长对水热条件的响应. *生态学报*, 2022, 42(13): 5371-5380.
- [17] 贾存, 郭明明, 王倩, 崔立志, 郭敬丽, 陈忠震, 李永宁. 华北落叶松人工林和天然林径向生长对气候变化的响应. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(1): 120-128.
- [18] 任旭明, 宫渊奇, 王平安, 薄夫京, 张芸香, 郭晋平. 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.
- [19] 陈忠震, 石君杰, 贾存, 李永祥, 刘家丞, 金辉, 李永宁. 天然华北落叶松径向生长对气候变化的响应. *林业资源管理*, 2019(2): 60-66, 146.
- [20] 梁慧敏, 魏江生, 贺敏, 周梅, 赵鹏武. 大兴安岭南段华北落叶松人工林径向生长对气候变化的响应. *温带林业研究*, 2019, 2(3): 31-36, 62.
- [21] 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.

- [22] 郑壮鹏, 赵思媛, 周非飞, 和金福, 胡善斌, 董志鹏, 陈诗音, 方克艳. 亚洲树轮平均敏感度分布特征及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(3): 805-813.
- [23] Lloret F, Keeling E G, Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 2011, 120(12): 1909-1920.
- [24] Gao S, Liang E Y, Liu R S, Babst F, Julio Camarero J, Fu Y H, Piao S L, Rossi S, Shen M G, Wang T, Peñuelas J. An earlier start of the thermal growing season enhances tree growth in cold humid areas but not in dry areas. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(4): 397-404.
- [25] 郭滨德, 钟瑞, 张耀明, 徐静, 栾兆平. 小兴安岭红皮云杉径向生长对气候变化的响应. 温带林业研究, 2023, 6(4): 31-34.
- [26] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 方克艳, 李晓岚, 栗燕, 布文丽, 李玉晗. 芦芽山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)树轮宽度年表对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(6): 1608-1618.
- [27] Jing M D, Zhu L J, Liu S G, Cao Y, Zhu Y, Yan W D. Warming-induced drought leads to tree growth decline in subtropics: Evidence from tree rings in Central China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 964400.
- [28] Zhang R, Hu Z H, Cherubini P, Cooper D J, Zhu L J, Lei P F. Tree-ring data reveal trees are suffering from severe drought stress in the humid subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2023, 546: 121330.
- [29] Helman D, Lensky I M, Yakir D, Osem Y. Forests growing under dry conditions have higher hydrological resilience to drought than do more humid forests. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2801-2817.
- [30] 苟晓霞, 张同文, 喻树龙, 张瑞波, 姜盛夏, 郭玉琳. 不同生境下圆柏径向生长的气候响应. 生态学杂志, 2021, 40(6): 1574-1588.
- [31] 刘美君, 陈秋文, 吕金林, 李国庆, 杜盛. 黄土丘陵区辽东栎和刺槐树干径向生长与微变化季节动态特征. 植物生态学报, 2023, 47(2): 227-237.
- [32] 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西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.
- [33] Steppe K, Sterck F, Deslauriers A. Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(6): 335-343.
- [34] 柳荻, 宋文琦, 赵彬清, 王兴昌, 安杨, 李宗善, 王晓春. 穆棱地区不同水分条件下3个树种木质部解剖参数比较. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 53-65.
- [35] Liu R, Li Y, Wang Y G, Ma J, Cieraad E. Variation of water use efficiency across seasons and years: Different role of herbaceous plants in desert ecosystem. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 827-835.
- [36] 邓国富, 李明启. 树轮密度对气候的响应及重建研究进展. 地理科学进展, 2021, 40(2): 343-356.
- [37] He M H, Shishov V, Kaparova N, Yang B, Bräuning A, Griebinger J. Process-based modeling of tree-ring formation and its relationships with climate on the Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 2017, 42: 31-41.
- [38] 李嘉宁, 张赞, 田昆, 曹仁杰, 覃鑫浩. 玉龙雪山不同针叶树种树轮宽度年表特征及其与气候因子的关系. 西北植物学报, 2022, 42(3): 473-480.
- [39] Gauli A, Neupane P R, Mundhenk P, Köhl M. Effect of climate change on the growth of tree species: dendroclimatological analysis. *Forests*, 2022, 13(4): 496.
- [40] 王国蕊, 徐丽宏, 于澎涛, 王彦辉, 张西婷, 胡振华, 刘泽彬, 李佳梅. 六盘山南坡不同密度华北落叶松人工林年内径向生长动态及其影响因素. 林业科学研究, 2024, 37(2): 72-80.
- [41] 侯帅, 徐国保, 王波, 陈拓, 吴国菊, 吕玫霞, 李晓琴, 吕海元, 车宗玺. 祁连山东部青海云杉死亡和健康个体的径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2024, 44(11): 4708-4718.
- [42] Zhou F F, Fang K Y, Zhang F, Dong Z P. Hydroclimate change encoded in tree rings of Fengshui woods in southeastern China and its teleconnection with El Niño-Southern Oscillation. *Water Resources Research*, 2020, 56(1): e2018WR024612.
- [43] 朱良军, 李宗善, 王晓春. 树轮木质部解剖特征及其与环境变化的关系. 植物生态学报, 2017, 41(2): 238-251.
- [44] 刘燕, 张凌楠, 刘晓宏, 曾小敏, 贾瑞萱. 干旱胁迫植物个体生理响应及其生态模型预测研究进展. 生态学报, 2023, 43(24): 10042-10053.
- [45] 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.
- [46] 张蓝霄, 李雅婧, 胡晓创, 孙守家, 张劲松, 蔡金峰, 孟平. 基于 Biome-BGC 模型的刺槐人工林生产力和内在水分利用效率研究. 林业科学研究, 2023, 36(3): 1-10.