DOI: 10.20103/j.stxb.202310292347
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.
Wang W Y, Wan Y F, Bai Y S, Wang D M, Yu P T, Wang Y H, Liu Y L, Li Z S.Effect of slope aspect on the relationship between radial growth and climate of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation in Liupan Mountain.Acta Ecologica Sinica,2024,44(16):7290-7300.

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

王巍樾[1],万艳芳[2],白雨诗[2],王冬梅[1,*],于澎涛[2],王彦辉[2],刘亚玲[1],李宗善[3]
1 北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京　100083
2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,国家林业和草原局森林生态环境重点实验室,北京　100091
3 中国科学院生态环境研究中心,北京　100085

摘要:黄土高原半干旱地区人工林生长受水分和温度影响显著,坡向作为重要的立地因子,在水热条件再分配中起到了决定性的作用。利用树木年轮学方法测定了 1995—2020 年六盘山叠叠沟小流域阴坡、半阴坡和阳坡的华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林优势木逐年树轮宽度,建立树轮宽度标准年表(STD)和差值年表(RES)分析不同坡向林木生长特征及对气候响应的敏感性差异。研究结果表明:(1)各坡向优势木年表质量表现为阴坡最好、阳坡最差。(2)阴坡树木受最高气温和最低气温抑制作用显著(上年 6、11 月和当年 7 月);半阴坡树木与当年 7 月平均气温显著负相关;阳坡树木与平均气温的相关性低。(3)不同坡向树木均与上年 8 月降水量显著正相关,且阳坡树木对降水量的响应敏感性高于阴坡和半阴坡;半阴坡树木还受当年 7 月相对湿度的促进作用。(4)阳坡树木对干旱胁迫的响应敏感性高于半阴坡和阴坡,其中气象因素对阴坡树木径向生长变化的解释率最低。综上所述,六盘山半干旱区华北落叶松对气候响应的敏感性较高,且阳坡主要受降水量影响,阴坡受最高气温和最低气温影响较大,半阴坡则受温度和降水的共同调节。若发生干旱事件,阳坡树木径向生长下降幅度要远高于阴坡和半阴坡。结果为黄土高原土石山区华北落叶松人工林保护和可持续经营提供科学依据。

关键词:树木年轮;年表;气候响应;华北落叶松;黄土高原

Effect of slope aspect on the relationship between radial growth and climate of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation in Liupan Mountain

WANG Weiyue[1], WAN Yanfang[2], BAI Yushi[2], WANG Dongmei[1,*], YU Pengtao[2], WANG Yanhui[2], LIU Yaling[1], LI Zongshan[3]
1 *School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing* 100083, *China*
2 *Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
3 *Research Center of Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

Abstract: The growth of plantations in semi-arid areas of the Loess Plateau is significantly affected by water and temperature. The slope aspect, as an important site factor, plays a decisive role in the redistribution of water and heat conditions. In this study, dendrodological methods were used to determine the annual tree ring width of dominant *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations in shady slope, semi-shady slope and sunny slope in Diediegou small watershed

基金项目:"十四五"国家重点研发课题(2022YFF1300404);国家自然科学基金(U21A2005,U20A2085)
收稿日期:2023-10-29;　　**网络出版日期**:2024-06-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dmwang@ bjfu.edu.cn

of Liupan Mountain from 1995 to 2020. Tree ring width Standard chronology (STD) and Residual chronology (RES) were established to analyze the growth characteristics of the dominant *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* and its sensitivity to climate response. The results showed that: (1) the chronology quality of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* in each slope direction was the best on the shady slope and the worst on the sunny slope. (2) The trees on the shady slope were significantly inhibited by the maximum temperature and the minimum temperature (June, November of last year and July in the current year), and the trees on the semi-shady slope had a significant negative correlation with the average temperature in July of that year, while the trees on the sunny slope had a low correlation with the average temperature. (3) The trees on different slope directions were significantly positively correlated with precipitation in August of last year, and the response sensitivity of the trees on the sunny slope to precipitation was higher than that of the shady slope and the semi-shady slope. In addition, the relative humidity in July of the same year also promoted the growth of trees on semi-shady slope. (4) The response sensitivity of sunny slope to drought stress was higher than that of shady slope and semi-shady slope and the interpretation rate of tree radial growth by climate factors was the lowest in the shady slope. In conclusion, *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* with different slope directions in the semi-arid area of Liupan Mountain has a high sensitivity to climate response, the sunny slope is mainly affected by precipitation, the shady slope is affected by the maximum and minimum temperature, and the semi-shady slope is jointly regulated by temperature and precipitation. In case of drought events, the decline of radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* on the sunny slope was much higher than that on the shady slope and semi-shady slope. The results provide a scientific basis for the protection and sustainable management of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantation on the Loess Plateau.

Key Words: tree ring; chronology; climate response; *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; the Loess Plateau

黄土高原作为我国生态建设与经济发展的重要战略基地,拥有世界上面积最大的黄土堆积,也是世界上水土流失最严重的区域之一。1999 年国家实施退耕还林(草)生态工程,希望通过提高植被覆盖率来控制水土流失。但随着人工林的营造和发育,单一的结构和过大的造林密度使得森林发生了林分早衰、生产力低下等问题。尤其是在黄土高原干旱半干旱地区,复杂的地貌和时空分布不均匀的降水,使得树木生长受温度和水分的变化的影响更加显著[1—2]。因此,在黄土高原植被恢复与重建方面,其核心应更加关注树木生长的地带性分异和立地差别。

坡向作为一个重要的立地因子[3],可以通过接收太阳辐射量的差异来改变不同坡向的温度和湿度,进而影响树木径向生长。因此,在北方土石山区,坡向差异对林木径向生长的影响更大[4],且大多体现在不同坡向限制树木径向生长的气候因子的不同[5]。例如,在挪威北部巴杜弗斯地区,欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)径向生长在阴坡主要受生长季气温影响,在阳坡则受气温和降水共同影响[6]。天山的雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)径向生长在阳坡主要受降水的限制,在阴坡则主要受秋冬季温度的影响[7]。太行山的栓皮栎(*Quercus variabilis*)长势在阴坡优于阳坡,且阳坡显著受旱季降水影响[8],在柴达木盆地东缘,相对干旱的西坡树木径向生长受到的水分限制显著高于较湿润的东坡[9]。此外,相同气候因子作用时间的长短,也会导致不同坡向树木生长趋势的显著差异。一般情况下,半干旱地区树木径向生长更受水分限制,不同坡向间的土壤水分蒸发量是导致树木生长差异的主要原因[10]。持续的升温致使阴坡树木径向生长呈现显著上升趋势,但阳坡径向生长变化不明显[11]。随着降水量不断增加,温度则会逐渐转变为影响林木生长坡向差异的主要因子,此时因为阳坡的气温及热量条件均好于阴坡,其林木生长可能会受益更多[12—13]。

六盘山半干旱区位于宁夏南部,属黄土高原土石山区,是泾河、清水河等黄土高原主要河流的发源地,保障区域供水、维护区域生态安全有着不可替代的作用[14]。近年来,六盘山半干旱地区的研究较多关注不同海拔或单株日尺度条件下的林木与气象要素响应分析,对坡向差异和年内降水分配不均匀的问题考虑不够充分。因此,本研究以六盘山区的主要造林树种华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林为研

究对象,开展不同坡向华北落叶松对气象要素的变化响应研究,量化不同坡向下林木生长主要影响因子的影响程度。有助于深入认识和准确预测华北落叶松人工林的生长规律和气候变化响应,改善黄土高原半干旱区人工林的经营方法,提高管理水平,并为指导其可持续经营提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏省固原市原州区叠叠沟小流域(35°54′12″—35°58′33″N,106°4′55″—106°9′15″E),流域面积 25.4 km^2,海拔在 1975—2615 m 之间,处于六盘山北段西侧的土石山区与周边黄土区的过渡带上。该流域为半干旱大陆性季风气候,年均气温 7.8 ℃,最冷月均温-6.5 ℃(1 月),极端低温-27.7 ℃,最热月均温 20.1 ℃(7 月),极端高温 34.4 ℃;年均降水量(449±155) mm,7—9 月降水量占全年降水量的 69.3%,年均潜在蒸发量(1050±180.5) mm 左右,为降水量的 2—3 倍。流域上游土壤类型主要为黄绵土和红黏土,土层较厚,中、下游是土层较薄的灰褐土,土层厚度 20—300 cm。华北落叶松人工林作为主要造林树种,多分布在阴坡和半阴坡。灌木多为虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne)和沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)等。草本植物丰富,主要有细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii* Web. ex Stechm.)和草地风毛菊(*Saussurea amara* (L.) DC.)等。

1.2 样地概况

样地位于叠叠沟小流域下游海拔为 2100 m 的坡面中部,是华北落叶松人工林的主要分布坡向范围(西北坡-北坡-东南坡)。不同坡向样地的林分结构和土壤厚度均有较大差异。半阴坡林龄约为 23 a,郁闭度 0.8,平均林分密度 1500 株/hm^2,土壤厚度为 1.4 m。阴坡林龄约为 24 a,平均郁闭度 0.8,平均林分密度 1313 株/hm^2,土壤厚度大于 1.4 m。阳坡林龄约为 10 a,郁闭度 0.3,平均林分密度 525 株/hm^2,土壤厚度 0.9 m。土壤容重、土壤孔隙度及田间持水量则差异不大(表 1)。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots

采样点 Sampling sites	坡向 Aspect/(°)	样地编号 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	土壤厚度 Soil thickness/m	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm^3)	土壤总孔隙度 Total soil porosity/%	田间持水量 Field capacity/%	林龄 Stand age/a	林冠郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand density/(株/hm^2)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m
半阴坡	北偏西 64	A1	2110	33	1.3	1.1	56.0	38.8	24	0.8	1250	11.0	8.8
Semi-shady slope	北偏西 50	A2	2110	24	1.4	1.1	54.4	37.2	23	0.7	1750	10.9	8.7
阴坡	北偏西 31	A3	2095	35	1.4	1.0	59.4	49.3	25	0.9	1475	12.6	9.4
Shady slope	正北 0	A4	2095	26	>2	1.1	57.0	44.6	24	0.8	1150	13.5	10.4
阳坡	东偏南 4	A10	2110	25	0.9	1.1	54.7	42.6	11	0.4	575	7.5	5.7
Sunny slope	东偏南 11	A11	2110	26	0.8	1.0	57.7	45.2	10	0.2	475	6.6	4.3

1.3 实验设计及样品采集

选择阴坡、半阴坡和阳坡三个坡向,在每个坡向的坡中位置连续布设 20 m×40 m 的样地。为了减少林内竞争的影响,充分体现林木生长对气候的响应[15],在各样地每木检尺的基础上,按相对树高选出优势木(树高/平均树高>1.1)。本研究于 3 个坡向各选取了 30 株优势木进行研究,共计 90 株。

用内径 5.15 mm 的生长锥对优势木样树进行取样,取样位置为距地面 1.3 m 处,沿东西方向和南北方向分别钻取 1 个树芯,共计 180 个样芯,将取好的树芯装进塑料管内,做好标记后带回实验室进一步处理。在实验室将采集的样芯风干、固定、用不同粗糙度(200、400 目和 600 目)的砂纸顺序打磨后进行交叉定年,用测量精度为 0.001 mm 的 LINTAB 树轮宽度量测系统(RINNTECH,Heidelberg,Germany)量测每个树芯的年轮宽度,用 COFECHA 程序[16]对所有样本目视定年的准确性进行检测。根据 COFECHA 的检验结果,剔除缺轮、破

损及重复取样的树芯,最终得到 88 个有效树芯数据进行年表建立。

1.4　气象数据获取

气象数据来源于固原气象站(距采样点约 10 km),时间跨度为 1995—2020 年。气象要素主要包括月均气温(平均、最高和最低气温)、月均相对湿度和降水量(图 1)。SPEI(标准化降水蒸散指数)作为反映降水蒸散的代用指标,既保留了 PDSI(帕默尔干旱指数)对潜在蒸散敏感的优点,又具备 SPI(标准化降水指数)的多时间尺度特征,是评估干旱程度的较好指标[17],因此,选用 SPEI 代表气象的干旱程度,其值越小越干旱[18]。本文的 SPEI 数据是基于固原气象站的降水和温度的数据,在 R 中使用 thornthwaite 方法计算 PET,再运用“SPEI”包计算得到 12 个月尺度的 SPEI。由于树木的生长具有连贯性,即树木当年生长受前一年气候影响,因此选用上年 6 月到当年 10 月的气象数据进行气候响应分析。

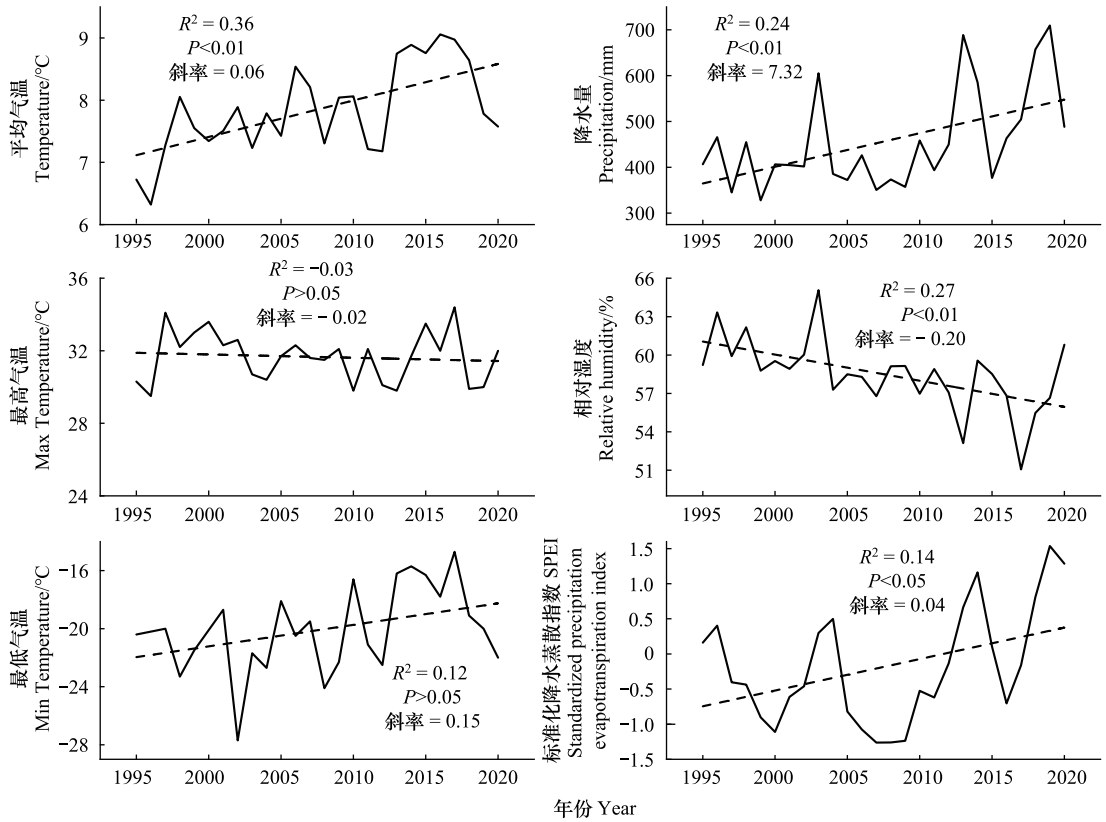

图 1　固原地区气象要素年际变化趋势(1995—2020 年)

Fig.1　Interannual variation trend of climate factors in Guyuan Region (1995—2020)

1.5　年表的建立

使用 ARSTAN 程序建立年表,得到华北落叶松标准年表(Standard chronology,STD)和差值年表(Residual chronology,RES),本程序主要运用了负指数函数和样条函数来拟合树木的生长曲线,以此消除树木间竞争产生的抑制干扰,以及树木本身遗传因子的影响。之后进行标准化处理,即利用样本序列值和其拟合生长曲线值的商进行订正[19]。该方法可去除树木生长趋势以及非一致性扰动导致的非气候信号,突出其中的气候信号[20],也能减少树间竞争、地形、地貌等因素对年表指数拟合的影响。

1.6　年表统计特征参数值

年表的质量需要通过各项特征参数值来评定,其中,标准差作为反映树木径向生长年际变化的指标,其偏差越高表明样本间的一致性越低[21]。平均敏感度和信噪比则主要代表气候的短期变化和高频变化,当平均敏感度均超过 0.15、信噪比超过 4 时,年表质量更好[22—23]。一阶自相关系数能反映上年气候状况对当年树轮

宽度生长影响的强弱[24]。此外,样芯间相关系数和样本总体代表性越高,年轮宽度变化的一致性越高[20],较差的林木质量则会导致林木代表性降低[25]。

1.7 数据处理与分析方法

用 Origin2021 软件计算 1995—2020 年各坡向华北落叶松优势木的标准年表与上年 6 月份到当年 10 月份的月均最低气温、平均气温、最高气温和相对湿度及总降水量之间的相关系数,以确定限制树木径向生长的主要气象要素。再用 SPSS 25 软件构建多元线性回归方程,解释各坡向树木生长受气象要素影响的敏感程度。

2 研究结果

2.1 不同坡向华北落叶松年表统计特征及变化趋势

为保证华北落叶松标准年表(STD)和差值年表(RES)质量的准确性,我们评价了年表中的各项气候信号指标(表 2)。不同坡向平均值(MD)基本呈现半阴坡最大,最小坡向则在 STD 和 RES 中有所差异,分别为阳坡和阴坡。标准差(SD)最大值也出现在半阴坡,其最小值均出现在阳坡。平均敏感度(MS)、样芯间相关系数(Rbt)、样本总体代表性(EPS)和信噪比(SNR)则均呈现阴坡最大、阳坡最小的变化规律,且 MS 与 SNR 分别超过 0.15 和 0.4,代表本研究年表质量较好。其中,一阶自相关系数(ARI)在不同坡向和不同年表中变化差异较大,STD 中的 ARI 数值较高,最大值出现在半阴坡;RES 中的 ARI 数值较小,最大值出现在阳坡。

表 2 不同坡向华北落叶松标准年表

Table 2 Standard chronology of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* with different slope

时间跨度 Time	年表 Chronology	坡向 Aspect	样本量 Samples	平均值 MD	标准差 SD	平均敏感度 MS	一阶自相关 ARI	样芯间相关系数 Rbt	样本总体代表性 EPS	信噪比 SNR
1995—2020	标准	阴坡	30	0.87	0.43	0.34	0.33	0.52	0.94	14.30
		半阴坡	29	1.00	0.52	0.32	0.53	0.36	0.87	6.61
		阳坡	29	0.84	0.30	0.23	0.50	0.32	0.83	4.72
	差值	阴坡	30	0.95	0.40	0.44	0.12	0.49	0.93	12.29
		半阴坡	29	1.03	0.41	0.44	0.16	0.33	0.86	5.97
		阳坡	29	1.01	0.24	0.24	0.18	0.28	0.80	3.87

平均值 MD:Mean;标准差 SD: Standard deviation; 平均敏感度 MS: Mean sensitivity; 一阶自相关系数 AC1: Autocorrelation order 1; 样芯间相关系数 Rbt: Mean inter-series correlation; 样本总体代表性 EPS: Express population signal; 信噪比 SNR: Signal-to-noise ratio

此外,STD 中阴坡和半阴坡的树轮宽度指数在 1995—2020 年期间(图 2),平均生长速率分别为 0.99±

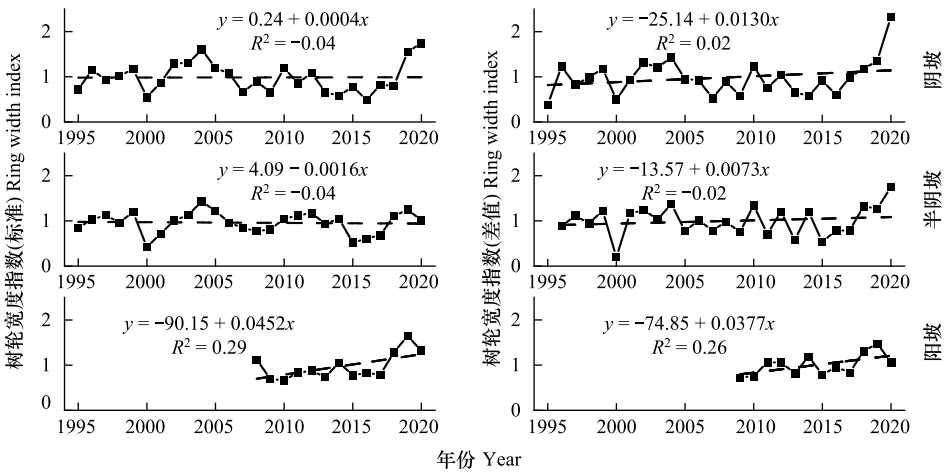

图 2 六盘山地区华北落叶松树轮宽度指数年际变化

Fig.2 Interannual variation of ring width index of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* in Liupan Mountain area

0.33、0.96±0.24,均呈现平稳变化,表明阴坡和半阴坡华北落叶松年轮的变化受到相似环境条件的限制。阳坡呈现平稳上升趋势,生长速率为 0.97±0.3。RES 中不同坡向年际树轮宽度指数变化趋势与 STD 相似,阴坡、半阴坡和阳坡平均生长速率分别为 0.98±0.40、1.00±0.3 和 1.00±0.2。此外,虽然阳坡 STD 呈现的上升趋势较其他坡向更加显著,但 RES 中阳坡也成上升趋势,表明此时阳坡树木的生长与年龄无关。

2.2　不同坡向华北落叶松年表与气象要素的关系

六盘山地区林木径向生长受温度和降水的共同影响。华北落叶松标准年表在阴坡与当年 7 月份平均气温显著负相关,与上年 8 月份、当年 1 月份降水量和上年 8—12 月份、当年 1——7 月份的 SPEI 显著正相关;在半阴坡与当年 7 月份的平均气温和最低气温显著负相关,与上年 8 月份的降水量和当年 7、8 月份的相对湿度以及上年 8—12 月份、当年 1—7 月的 SPEI 显著正相关;在阳坡与上年 8 月份、当年 8 月份的降水量显著正相关,与上年 11、12 月份和当年 1—6、9、10 月份的 SPEI 也呈显著正相关($P<0.05$,图 3)。

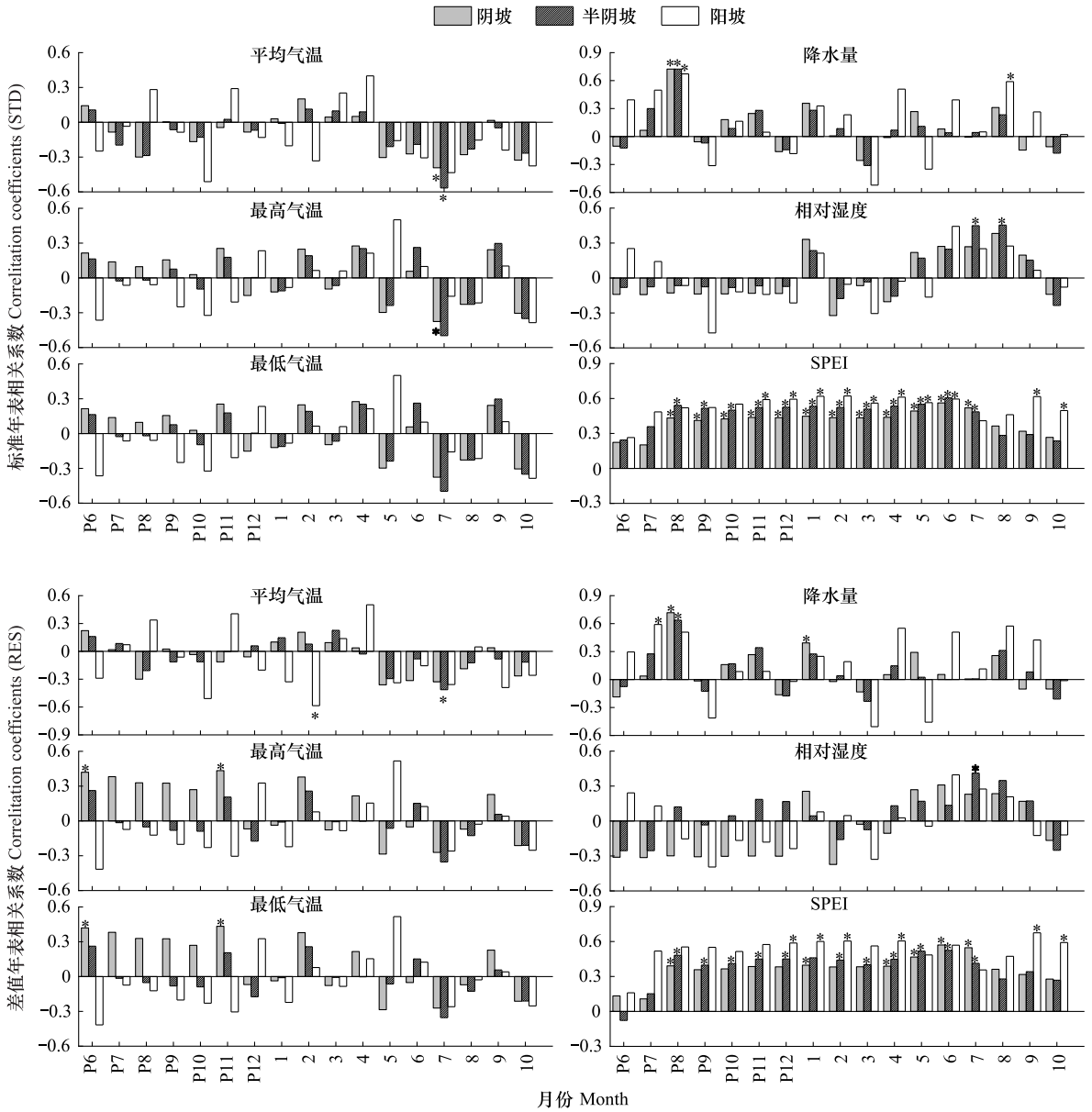

图 3　华北落叶松年表与气象要素的相关关系

Fig.3　Correlation coefficient of Larix gmelinii var. principis-rupprechtii chronology between climatic factors

“p”代表上一年

华北落叶松差值年表在阴坡与上年 6 和 11 月份的最高气温和最低气温、上年 8 月份和当年 1 月份的降水量、上年 8 月份和当年 1、4—7 月份的 SPEI 均呈显著正相关;在半阴坡与当年 7 月份平均气温显著负相关,与上年 8 月份降水量、当年 7 月份相对湿度、上年 8—12 月份和当年 1—7 月份的 SPEI 显著正相关;在阳坡与当年 2 月份的平均气温显著负相关,与上年 7 月份降水量、上年 12 月份和当年 1—2、4、9—10 月份的 SPEI 呈显著正相关($P<0.05$,图 3)。

2.3 不同坡向华北落叶松的多元线性回归方程

标准年表中阴坡的气象要素对华北落叶松径向生长的解释率最低,仅为 57%(表 3)。其中,上年 8 月的降水量和上年 12 月、当年 2、4、5、7 月的 SPEI 分别解释了林木径向生长变化的 8.6%、36.8%、37.1%、6.4%、7.3%、3.7%(图 4)。半阴坡次之(66.9%),当年 7 月的最低气温,上年 8 月的降水量,当年 8 月的相对湿度和当年 1、3、5、7 月的 SPEI 分别解释了林木径向生长变化的 6.0%、12.3%、7.9%、25.5%、27.1%、10.1%和 11.1%。而在阳坡,气象要素对林木径向生长的解释率高达 98%。上年 8 月和当年 8 月的降水量,以及上年 11 月、当年 2、3、4、6、9 月的 SPEI 分别解释了林木径向生长变化的 2.0%、1.7%、33.9%、35.9%、9.4%、12%、3.4%和 1.7%。

表 3 标准年表与气象要素的多元回归统计结果

Table 3 Multiple regression statistical results of standard chronology and climatic factors

坡向 Aspect	回归模型 Regression equations	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2	P
阴坡 Shady slope	$Y=1.111\times 降水量^*_{p8}-4.752\times SPEI^*_{p12}+4.788\times SPEI^*_2-0.824\times SPEI_4+0.942\times SPEI^*_5-0.483\times SPEI_7$	0.673	0.570	<0.01
半阴坡 Semi-shady slope	$Y=-0.386\times 最低气温^*_7+0.785\times 降水量^*_{p8}+0.503\times 相对湿度^*_8+1.632\times SPEI^*_1-1.731\times SPEI^*_3+0.648\times SPEI^*_5-0.708\times SPEI^*_7$	0.766	0.669	<0.01
阳坡 Sunny slope	$Y=0.544\times 降水量^*_{p8}+0.478\times 降水量^*_8-9.304\times SPEI^*_{p11}+9.837\times SPEI^*_2-2.586\times SPEI^*_3+3.294\times SPEI^*_4-0.920\times SPEI^*_6-0.476\times SPEI^*_9$	0.993	0.980	<0.01

差值年表中坡向变化与标准年表相似(表 4),阴坡华北落叶松对气象因子的敏感性最小(58%),半阴坡次之(59.5%),阳坡最大(64%)。其中,上年 11 月的最高气温、上年 6、11 月的最低气温和当年 4、5 月的 SPEI 分别解释了阴坡林木径向生长变化的 6.1%、81.0%和 12.9%。当年 7 月的平均气温,上年 8 月的降水量,当年 7 月的相对湿度和当年 4、5、7 月的 SPEI 分别解释了半阴坡林木径向生长变化的 8.6%、20.3%、13.7 和57.1%。当年 2 月的平均气温和上年 12 月、当年 2、9 月的 SPEI 分别解释了阳坡林木径向生长变化的 4.6%、43.7%、48.8%和 3.0%。

表 4 差值年表与气候因子的多元回归统计结果

Table 4 Multiple regression statistical results of difference chronology and climate factors

坡向 Aspect	回归模型 Regression equations	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2	P
阴坡 Shady slope	$Y=1.276\times 最高气温^*_{p11}-8.091\times 最低气温^*_{p6}+8.764\times 最低气温^*_{p11}-1.197\times SPEI^*_4+1.489\times SPEI^*_5$	0.668	0.580	<0.01
半阴坡 Semi-shady slope	$Y=0.410\times 平均气温_7+0.972\times 降水量^*_{p8}+0.658\times 相对湿度^*_7-0.625\times SPEI_4+1.220\times SPEI^*_5-0.909\times SPEI^*_7$	0.697	0.595	<0.01
阳坡 Sunny slope	$Y=-0.414\times 平均气温_2-3.957\times SPEI_{p12}+4.418\times SPEI_2+0.271\times SPEI_9$	0.771	0.640	<0.05

* 代表自变量与因变量之间的相关程度达到 95%置信水平

3 讨论

3.1 不同坡向华北落叶松年表质量对比

对比 3 个坡向华北落叶松标准年表(STD)和差值年表(RES)的统计特征参数值(表 2),发现不同坡向的

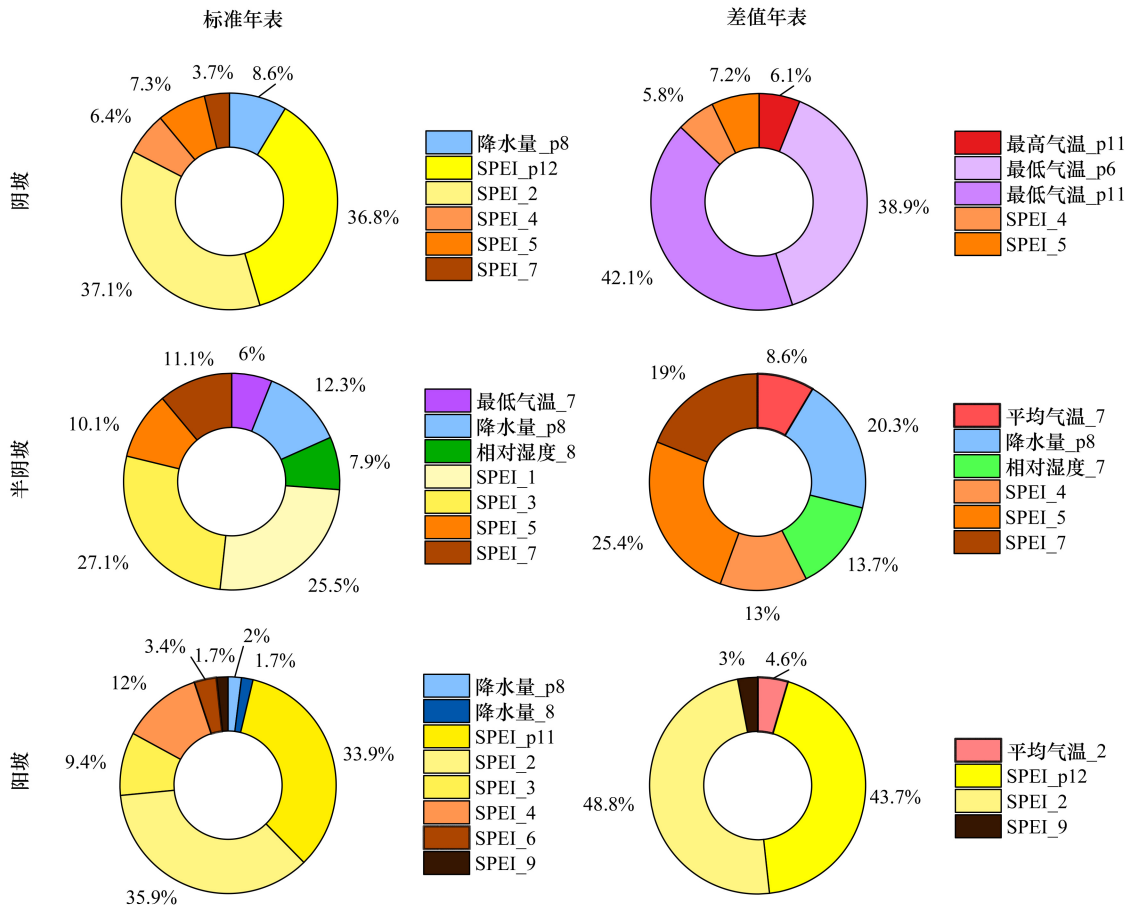

图 4　不同坡向上各气象因子对径向生长的解释率

Fig.4　Interpretation rate of radial growth by meteorological factors on different slopes

下划线后“p”代表上一年,“数字”代表月份

STD 和 RES 均包含较多气候信号,其各项参数值变化也较为一致。但在气候敏感性、样本信号一致性等方面仍存在一定差别。STD 和 RES 中平均敏感度的最大值分别出现在阴坡和半阴坡,其敏感度差异可能是 RES 进一步考虑了树轮宽度序列在林内竞争和外部环境干扰下发生的低频变化以及时间序列的自回归模式,去掉了树木个体特有的前期生理条件对后期生长造成的连续性影响[26—27],也排除了阴坡的林分密度优势,这与本研究中一阶自相关系数的变化差异正好相匹配。此外,样本间平均相关系数、信噪比和样本总体代表性在两个年表中均呈现阴坡最大、阳坡最小的现象,表明气象要素对树木生长的限制作用由阴坡向半阴坡和阳坡逐渐增大,且年轮宽度变化规律的一致性逐渐下降[28],姜倩倩等[29]研究油松和麻栎的树轮宽度年表特征随坡向的变化特征时,也发现气候变化对阳坡的树木影响更显著。而研究中的标准差呈现半阴坡最大、阳坡最小,可能是由于半阴坡林木不是同年种植,林木长速各异,样本间的一致性较低;而阳坡树木林龄较小,林分密度较低,树木生长受限制因素较少,因此样本间一致性高[30]。

3.2　不同坡向华北落叶松年表与气象要素关系特征

通过年表的相关性分析结果可以看出,本研究区不同坡向上林木生长受水分影响差异较小。具体表现为,年表与降水量多呈正相关,各坡向树轮宽度均与上年 8 月降水量显著正相关,表明华北落叶松径向生长与降水存在“滞后效应”,若上年生长季后期降水量充沛,林木的树干和根系能在进入休眠期前储存较多的营养物质[31]。春季来临后,土壤层中的有效水分又保证了生长季前期林木的正常启动,促使生长季可以更早的开始,延长林木生长时间[32]。此外,林木生长仅在当年生长季受相对湿度的正向影响,是因为生长季前期,主导

植被细胞分裂的主要因子是光照,过高的相对湿度会削弱光照的时长和强度,导致树木生长速率降低[33]。

华北落叶松径向生长受温度影响的坡向差异较大,本研究中阴坡林木径向生长与最高气温和最低气温在上年多呈正相关,在当年生长季多呈负相关,且与生长季 SPEI 显著正相关,表明阴坡更受生长季干旱胁迫的影响,上年生长季末期与冬季休眠期温度的上升,可以使得光照较少的阴坡植物生长时间延长,冬季积雪融化,积累更多的有机物质和水分来满足植物在非生长季的新陈代谢需求,使得早材细胞能够提前开始分裂[34]。此外,阴坡光照相对较少,光合作用较弱,若当年生长季温度较高,林木只能消耗体内营养物质来满足旺盛的呼吸作用,从而形成窄轮[35]。半阴坡华北落叶松多与当年 7 月的平均气温显著负相关,受上年 8 月到当年 7 月的 SPEI 正向影响,结合相对湿度的响应变化,可以看出半阴坡的径向生长更多是受生长季温度和降水量的共同调控[36]。植物在生长季进行着剧烈的生理活动,此时温度的上升会加快树木的蒸腾速率、导致生理代谢活动更加旺盛,从而降低树木的径向生长速率[37],而相对湿度的增加,则可以减少植物蒸腾导致的水分损失,间接促进碳水化合物的储存,为下年植物生长提供充足养分[38, 39]。阳坡则更受非生长季(上年 11—12 月和当年 1、2、9—10 月)干旱胁迫的影响,这是因为生长季的干旱胁迫时间较短,林木可以进行适应性调整(例如关闭气孔)来维持生长;而非生长季的干旱持续时间较长,导致林木的木质部发生栓塞,此时树木生长只能依赖于自身的水分贮藏量,因此受干旱胁迫抑制作用较强。阳坡林木生长与降水量的相关性较高,也是因为水分是短时间内修复栓塞的关键因子[40]。

3.3 不同坡向华北落叶松的线性回归方程质量对比

不同坡向的林木对气象要素响应的敏感度及稳定性存在显著差异[41],本研究中也体现了类似结果。标准年表和差值年表中气象要素对树木径向生长的解释率均为阴坡最低,半阴坡次之,阳坡最高。

在阴坡,通过对比两个年表的回归方程,可以看出休眠期的 SPEI(上年 12 月和当年 2 月)和最低气温(上年 6、11 月)对树木径向生长的解释率较高,分别达到了 73.96%和 80.97%。表明冬季休眠期的 SPEI 对阴坡影响显著,冬末充足的降雪在初春温度升高时会快速融化,增加土壤湿度,补充土壤水分有效性,有利于木质部细胞的拓展,从而促进生长[42]。而上年冬季最低气温的升高可以减少低温冻害对植物根系的损伤,从而表现为对其生长的正反馈[43]。

在半阴坡,结合两个年表来看,上年 8 月的降水量以及当年 1 和 3 月的 SPEI 分别解释了树木径向生长变化的 20.28%和 52.61%。表明上年生长季的水分条件和当年休眠期、萌芽期的干旱胁迫对半阴坡径向生长的影响较大。若上年生长季降水量较多,则有利于提高林内相对湿度,促进植物气孔张开,使得光合作用加强,促进来年早材细胞生长[27]。而休眠期和萌芽期发生的干旱胁迫则会加剧土壤蒸散发,减少土壤可利用水,不利于木质部细胞的拓展,从而抑制了林木径向的增加[44—45]。这一结果与李晓琴等[46]在延安对狼牙刺的研究基本一致。

在阳坡,两个年表在休眠期(上年 11、12 月和当年 2 月)的 SPEI 对径向生长的解释率分别为 69.76%和 92.44%。可以看出,在休眠期,阳坡树木对 SPEI 表现出极高的敏感性,更易受干旱胁迫的影响。在半干旱地区,坡向差异主要受林内微气象的调控,其中,太阳辐射量是最主要的影响因子[47]。由于阳坡接收的净太阳辐射较大,导致林内空气温度较高、湿度较小,相应的饱和蒸汽压亏缺较大,从而直接影响到林木的蒸腾速率和光合速率[48—50],使得地表特性和径向生长速率产生坡向差异[51],即阳坡对干旱环境更加敏感。

4 结论

本研究区在 1995—2020 年气温与降水量均持续增加,呈现暖湿化趋势,但 SPEI 值多处于 1 以下(SPEI > 1 为湿润环境),且相对湿度以较大幅度(-0.2%/a)持续下降,因此该区域在研究时段仍为干旱环境,受干旱胁迫影响(图 1)。根据华北落叶松树轮宽度指数的年际变化,可看出在干旱环境下林木多数呈现轻微上升趋势,证明华北落叶松对干旱有一定的抵抗能力[52],可以较好的适应六盘山地区干旱的气候条件。但标准年表中半阴坡林木生长的下降趋势也表明了干旱胁迫会抑制林木的增长速率。

从相关分析和线性回归方程可看出,各坡向影响树木径向生长的主要因子有所不同,具体表现为在阴坡受温度影响显著,尤其是最高气温和最低气温;在半阴坡受上年生长季降水量与当年生长季的干旱胁迫影响较大;在阳坡则更多受非生长季的干旱胁迫和当年生长季的降水量影响。此外,土壤理化性质和土壤含水量也是影响树木径向生长的重要指标,在今后的研究中,应综合考虑环境因素(土壤和气候)对树木生长造成的影响。

本研究结果可为深入理解及准确预测黄土高原六盘山土石山区华北落叶松人工林的生长规律和气候变化响应以及指导其可持续经营提供科学指导。

参考文献(References):

[1] Huang J, Li Y, Fu C, Chen F, Fu Q, Dai A, Shinoda M, Ma Z, Guo W, Li Z, Zhang L, Liu Y, Yu H, He Y, Xie Y, Guan X, Ji M, Lin L, Wang S, Yan H, Wang G. Dryland climate change: recent progress and challenges. Reviews of Geophysics, 2017, 55(3): 719-778.

[2] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems. Environmental Management, 2004, 33(4): 528-544.

[3] Fekedulegn D, Hicks R, Colbert J J. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. Forest Ecology and Management, 2003, 177(1): 409-425.

[4] 薛盼盼, 缪宁, 王东, 张远东. 川西亚高山林线岷江冷杉和红杉对气候变化的响应. 生态学报, 2022, 42(23): 9701-9711.

[5] 薛盼盼, 缪宁, 罗建琼, 张远东, 毛康珊. 升温突变对川西不同坡向和海拔岷江冷杉径向生长的影响. 生态学报, 2023, 43(24): 10263-10273.

[6] Kirchhefer A J. The influence of slope aspect on tree ring growth of Pinus sylvestris L. in northern Norway and its implications for climate reconstruction. Dendrochronologia, 2000, 18: 27-40.

[7] 朱海峰, 王丽丽, 邵雪梅, 方修琦. 雪岭云杉树轮宽度对气候变化的响应. 地理学报, 2004, 59(6): 863-870.

[8] 王林, 冯锦霞, 王双霞, 贾长荣, 万贤崇. 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响. 生态学报, 2013, 33(8): 2425-2433.

[9] Liang E Y, Shao X M, Eckstein D, Huang L, Liu X H. Topography and species-dependent growth responses of *Sabina* przewalskii and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2/3): 268-277.

[10] Jiang Y, Wang B Q, Dong M Y, Huang Y M, Wang M C, Wang B. Response of daily stem radial growth of *Platycladus orientalis* to environmental factors in a semi-arid area of North China. Trees, 2015, 29(1): 87-96.

[11] 刘欣, 刘滨辉. 大兴安岭不同坡向兴安落叶松径向生长对气候变化的响应. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 13-17, 21.

[12] 乔晶晶, 王童, 潘磊, 孙玉军. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2231-2240.

[13] 白雪, 范泽鑫. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林水青树年轮宽度对气候变化的响应. 林业科学, 2018, 54(3): 161-167.

[14] 刘泽彬, 王彦辉, 徐丽宏, 邓秀秀, 田奥. 六盘山华北落叶松林坡面土壤含水量的时空变化. 山地学报, 2018, 36(1): 43-52.

[15] 于顺龙. 坡向、坡位对水曲柳中龄林生长与生物量分配的影响. 内蒙古林业调查设计, 2009, 32(1): 54-56.

[16] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.

[17] 薛华柱, 李阳阳, 董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923-934.

[18] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033-1043.

[19] 秦进, 白红英, 赵培, 杨娜娟, 岳军伟. 秦岭不同龄组巴山冷杉径向生长对气候因子的响应差异. 生态学报, 2022, 42(17): 7167-7176.

[20] Brubaker L B. Tree rings and climate. Ecology, 1977, 58(6): 1400-1401.

[21] Fritts H C. Tree rings and climate. London: Academic Press, 1976.

[22] Savva Y, Oleksyn J, Reich P B, Tjoelker M G, Vaganov E A, Modrzynski J. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. Trees, 2006, 20(6): 735-746.

[23] Smith K T. An organismal view of dendrochronology. Dendrochronologia, 2008, 26(3): 185-193.

[24] 赵国清, 信忠保, 柳金昊, 刘亚玲, 黄艳章, 李宗善. 澜沧江源区高山柏径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2024, 44(1): 235-245.

[25] 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 Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.

[26] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 买尔当·克依木, 闫腾飞. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应. 生态学报, 2022, 42(5): 1830-1840.

[27] Wu G J, Xu G B, Chen T, Liu X H, Zhang Y F, An W L, Wang W Z, Fang Z A, Yu S L. Age-dependent tree-ring growth responses of Schrenk

spruce (*Picea schrenkiana*) to climate—a case study in the Tianshan Mountain, China. Dendrochronologia, 2013, 31(4): 318-326.

[28] 郭滨德, 张远东, 王晓春. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异. 应用生态学报, 2016, 27(2): 354-364.

[29] 姜倩倩, 王丹, 郭挺松, 杨传强, 鲁法典. 徂徕山不同立地条件下油松、麻栎径向生长对气象因子的响应. 林业与生态科学, 2018, 33(1): 37-43, 55.

[30] D'Amato A W, Bradford J B, Fraver S, Palik B J. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. Ecological Applications, 2013, 23(8): 1735-1742.

[31] 李宗善, 陈维梁, 焦磊, 张钦弟, 李兆林, 王聪, 高光耀, 卫伟, 孙婧雅, 白应飞. 黄土高原健康和衰退刺槐林径向生长对气候的响应. 生态学报, 2024, 44(2): 757-769.

[32] 周小东, 常顺利, 王冠正, 张毓涛, 喻树龙, 张同文. 天山北坡中段雪岭云杉径向生长对气候变化的响应. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1215-1228.

[33] 朱明阳, 林琳, 佘雨龙, 肖城材, 赵通兴, 胡春相, 赵昌佑, 王文礼. 云南轿子山不同海拔急尖长苞冷杉径向生长动态及其低温阈值. 植物生态学报, 2022, 46(9): 1038-1049.

[34] Xie Y Y, Wang X J, Jr Silander J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(44): 13585-13590.

[35] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, Breshears D D, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams D G, Yepez E A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? New Phytologist, 2008, 178(4): 719-739.

[36] 韩金生, 赵慧颖, 朱良军, 张远东, 李宗善, 王晓春. 小兴安岭蒙古栎和黄菠萝径向生长对气候变化的响应比较. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2218-2230.

[37] 刘春月, 信忠保, 李宗善, 买尔当·克依木. 基于刺槐年轮重建黄土丘陵区小流域年径流输沙研究. 生态学报, 2024, 44(1): 343-353.

[38] Chen M, Zhang X, Li M, Zhang J J, Cao Y. Climate-growth pattern of *Pinus* tabulaeformis plantations and their resilience to drought events in the Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2021, 499: 119642.

[39] Rossi S, Deslauriers A, Griçar J, Seo J W, Rathgeber C B, Anfodillo T, Morin H, Levanic T, Oven P, Jalkanen R. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. Global Ecology and Biogeography, 2008, 17(6): 696-707.

[40] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 木本植物水力系统对干旱胁迫的响应机制. 植物生态学报, 2021, 45(9): 925-941.

[41] 王嘉川, 李书恒, 郭伊利, 韩宜洁, 毛忠雷. 管涔山华北落叶松径向生长对温度变化的动态响应. 生态学杂志, 2023, 42(7): 1568-1576.

[42] 吴丽杰, Arisa Kaewmano, 付培立, 王文礼, 范泽鑫. 热带季节性湿润林苦楝(*Melia azedarach*)径向生长季节动态及其对环境因子的响应. 生态学报, 2020, 40(19): 6831-6840.

[43] Keyimu M, Li Z S, Jiao L, Chen W L, Wu X C, Fan Z X, Zeng F J, Fu B J. Radial growth response of *Quercus* liaotungensis to climate change-a case study on the central Loess Plateau, China. Trees, 2022, 36(6): 1811-1822.

[44] Lloyd J, Farquhar G D. Effects of rising temperatures and[CO_2]on the physiology of tropical forest trees. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2008, 363(1498): 1811-1817.

[45] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2018, 38(22): 8040-8050.

[46] 李晓琴, 张凌楠, 曾小敏, 王可逸, 王雅波, 路强强, 刘晓宏. 黄土高原中部针叶树与灌木径向生长对气候的响应差异. 生态学报, 2020, 40(16): 5685-5697.

[47] Lee R, Sypolt C R. Toward a biophysical evaluation of forest site potential. Forest Science, 1974, 20(2): 145-154.

[48] Kramer P J, Kozlowski T T. Physiology of Trees. New York: McGraw-Hill, 1960.

[49] López-Moreno J I, Revuelto J, Gilaberte M, Morán-Tejeda E, Pons M, Jover E, Esteban P, García C, Pomeroy J W. The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(1): 207-219.

[50] Zhang W T, Jiang Y, Dong M Y, Kang M Y, Yang H C. Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. Forest Ecology and Management, 2012, 265: 142-149.

[51] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. Microclimate: The Biological Environment. New York: John Wiley & Sons Inc, 1983.

[52] Brubaker L B. Responses of tree populations to climatic change. Vegetatio, 1986, 67(2): 119-130.