#### DOI: 10.20103/j.stxb.202401080061

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.

Wang Z P, Zhang D Y, Zhang T W, Luo T R, Wang X R, Li X Y, Du B Y, Song K X.Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* tree ring width to climate factors at different elevations in the northern Greater Khingan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17):7646-7661.

# 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

王兆鹏1,张冬有1,2,\*,张同文3,罗陶然1,王新瑞1,李祥友1,杜秉运1,宋可心1

1哈尔滨师范大学寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室,哈尔滨 150025

2 黑龙江乌伊岭湿地生态系统国家定位观测研究站,伊春 153000

3 新疆气候中心,中国气象局树木年轮理化研究重点实验室,乌鲁木齐 830002

摘要:海拔梯度作为一个重要的环境因素,对植物的分布、种类、生长速度和生理特征具有深远的影响。为探究大兴安岭北部不同海拔樟子松(Pinus sylvestris var. mongolica)树轮宽度对气候因子的响应差异,利用大兴安岭北部满归地区 5 个海拔樟子松的树芯样本,建立树轮宽度年表,并分析 5 个海拔樟子松树木径向生长特征与气候要素的相关关系,进而探讨了不同海拔间的树木生长气候响应异同及响应关系的稳定性。研究结果表明,与其他海拔相比,中高海拔(1150m)樟子松树轮宽度年表可能包含更多的气候信息。树轮宽度年表与气候因子的相关分析表明,高海拔(1200 m)樟子松对温度的响应并不明显,仅与上年 10 月和当年 9 月的气温呈显著正相关,中高海拔和中海拔(900 m)的樟子松分别对生长季 4—9 月和 5—8 月的温度表现出较好的显著正相关,中低海拔(800 m)和低海拔(700 m)的樟子松均受到了干旱胁迫的抑制,均与当年 6 月的降水量呈显著正相关,与 4 月和 6 月的温度呈显著负相关,与上年 10 月到当年 9 月的帕默尔干旱指数均呈极显著正相关。气温发生突变后,高海拔、中高海拔和中海拔树轮宽度增加的主要原因。滑动相关分析结果显示,高海拔和低海拔的樟子松对气候因子的敏感性均减弱,中高海拔和中海拔樟子松对温度的敏感性增强,但中海拔樟子松对帕默尔干旱指数的敏感性减弱,中低海拔樟子松对降水和帕默尔干旱指数的敏感性减弱。研究揭示了大兴安岭北部不同海拔樟子松树木年轮宽度与气候因子之间的复杂关系,并为评估大兴安岭樟子松对未来气候变化的适应能力提供了科学依据。

# Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* tree ring width to climate factors at different elevations in the northern Greater Khingan Mountains

WANG Zhaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Dongyou<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Tongwen<sup>3</sup>, LUO Taoran<sup>1</sup>, WANG Xinrui<sup>1</sup>, LI Xiangyou<sup>1</sup>, DU Bingyun<sup>1</sup>, SONG Kexin<sup>1</sup>

1 Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Heilongjiang Wuyiling Wetland Ecosystem National Observation and Research Station, Yichun 153000, China

3 Xinjiang Climate Center, Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

Abstract: As an important environmental factor, elevation has a profound influence on the distribution, species

**基金项目**:国家自然科学基金项目(41671064);黑龙江省自然科学基金项目(LH2021D02);哈尔滨师范大学研究生创新项目(HSDBSCX 2022-102)

收稿日期:2024-01-08; 网络出版日期:2024-06-26

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangdy@ hrbnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

composition, growth rate, and physiological characteristics of plants. To investigate the differential response of tree ring width of Pinus sylvestris var. mongolica at different altitudes in the northern part of the northern Greater Khingan Mountains to climate factors, using tree core samples from five elevation sites of P. sylvestris var. mongolica in the northern part of the Greater Khingan Mountains, we established tree-ring width chronologies. By analyzing the radial growth characteristics of the five elevation sites and their correlation with climate factors, we explored the differences and stability of the tree growthclimate relationships at different elevations. The results showed that the tree-ring width chronology from the middle to high elevation site (1150m) contained more climate information compared to other elevations. Correlation analysis between treering width chronologies and climate factors revealed that the high elevation site showed a weak response to temperature, only significantly correlated with the temperature of the previous October and the current September. The middle-high and middle elevation sites of P. sylvestris var. mongolica exhibited a significant positive correlation with temperature during the growing season (April to September and May to August, respectively). Both middle-low and low elevation P. sylvestris var. mongolica were suppressed by drought stress, showed significant negative correlations with precipitation in June, and significant positive correlations with temperature in April and June. Moreover, they demonstrated highly significant positive correlations with the Palmer Drought Severity Index (PDSI) from the previous October to the current September. After temperature abrupt changes, the growth trend of high, middle-high, and middle elevation sites significantly increased, while the growth trend of middle-low and low elevation sites decreased. The correlation results showed that the average minimum temperature in May of the year was the main reason for the increase in tree-ring width at high, medium-high, and medium elevations. Moving correlation analysis indicated that the sensitivity of high and low elevation sites to climate factors decreased, while the sensitivity of middle-high and middle elevation sites to temperature increased. However, the sensitivity of the middle elevation site to PDSI decreased, and the sensitivity of middle-low elevation site to precipitation and PDSI decreased. This study revealed the complex relationship between tree-ring width and climate factors at different elevations of P. sylvestris var. mongolica in the northern part of the Greater Khingan Mountains, providing scientific basis for assessing the adaptability of this species to future climate change.

Key Words: Pinus sylvestris var. mongolica; tree rings; the Greater Khingan Mountains; climatic factor; abrupt temperature change

根据联合国第六次政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告的结论可知,气候变暖可能在北半球和 高海拔地区表现得更为显著<sup>[1]</sup>。气候变化不仅影响人类社会的经济、政治和文化,也对自然环境的结构与功 能产生深刻影响<sup>[2]</sup>。作为地球上最关键的生态系统之一的森林生态系统,其对于气候变化的反应与适应能 力尤为重要。树木构成了森林生态系统的基础组成部分,气候变化与树木的径向生长之间的相互关系能够揭 示森林生态系统对气候变化的响应机制<sup>[3]</sup>。树木年轮因其分辨率高、测量方便而被用于精确定年。因此,树 木年轮测量为气候变化研究提供了重要数据<sup>[4]</sup>。

树木的生长及对气候因子的响应在不同的地区和树种中存在着分异现象,并且这种分异现象的变化方向 可能因为气候变化和特定环境条件的影响存在着许多不确定性<sup>[5-7]</sup>。例如,Benito等<sup>[7]</sup>发现 1980 年后气候 变化对地中海伊比利亚半岛南北方树木生长产生了相反的影响。部分学者认为分异现象出现的主要原因,是 由于研究区域气温发生突变,改变了树木径向生长对温度变化的敏感性,随着温度上升可能会引起干旱胁迫, 致使树木径向生长对降水的敏感性增强<sup>[8-9]</sup>。海拔可能是影响分异变化不确定性的重要因素,在高纬度、高 海拔地区气候变暖会促进树木的生长。而在低海拔地区这种影响不明显,甚至会与干旱共同作用导致树木和 森林减少<sup>[10-11]</sup>。这一现象与广为接受的生态幅概念相符合,受到树木遗传特性决定,树木只能在生态幅限制 范围内生长,在接近生态幅边缘时,树轮指标与环境因子的关系会发生变化<sup>[12]</sup>。但气候不仅影响了树木的生 长,气候之间还会相互影响。因此,在全球变暖背景下,探究相同区域内树木径向生长对限制气候因子响应关 系的稳定性是非常有必要的。

山地的森林对气候变化响应的敏感性较高<sup>[13]</sup>,是研究全球变暖背景下植物生长对全球变化的响应机制的理想区域。树木生长与气候的关系随海拔高度变化存在差异<sup>[14]</sup>。由于水热条件不同,海拔高度对树木的生长有很大影响,导致树木生长环境复杂<sup>[15—16]</sup>。以往的研究表明,在高海拔或接近林线的地区,树木对夏季气温有较强的正响应,而在海拔较低的地区,树木对降水有正响应<sup>[17—19]</sup>。然而,不同地区限制树木径向生长的气候因子存在差异,导致不同海拔高度的树木径向生长对气候变化响应模式也不同<sup>[20]</sup>。例如,美国阿巴拉契亚山脉南部<sup>[21]</sup>、中国青藏高原祁连山<sup>[22]</sup>和中国西藏的布泽山和叶拉山<sup>[23]</sup>,树木径向生长与气温和降水之间存在着复杂的非线性关系。因此,厘清不同海拔地区树木对气候变化响应的稳定性特征至关重要。了解其潜在的响应机制对树木气候学研究具有重要的科学意义。

大兴安岭位于中国东北高纬度冻土区,是西伯利亚冬季风南下的必经之路,也是夏季风北上的边缘地带, 为中国东北平原和华北平原的重要生态屏障。地处欧亚大陆多年冻土区的最南端,位于"东北亚"环境敏感 区域的高寒地带,该区域近年来极易受到气候变化的影响<sup>[24-25]</sup>。在大兴安岭不同海拔地区开展的树木年轮 研究很少。该地区的年降水量为400mm,温度与降水量之间的关系复杂,因此很难确定限制该地区树木径向 生长的主要气候因素。由于森林生态系统受到西伯利亚冬季季风和来自南方的夏季季风的共同影响,其森林 生态系统对气候变化具有极高的敏感性和脆弱性<sup>[25]</sup>。目前在大兴安岭地区已开展了较多的树木年轮气候学 研究<sup>[26-29]</sup>,从不同角度分析了大兴安岭樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长与气候变化之间的关系,表 明大兴安岭不同地区樟子松生长的主要气候限制因子不同,气候变暖对其生长的影响也不尽相同。虽然,该 地区在评估樟子松径向生长随气候变化的变化方面已经取得了许多重要成果,但仍缺乏对同一区域不同海拔 方面的研究。

为此,本研究在气候变暖的背景下,以大兴安岭北部北岸林场5个海拔樟子松为研究对象,利用树轮宽度 资料,分析其径向生长与不同时间尺度气候因子相关关系。研究旨在确定影响不同海拔高度树木径向生长的 主要气候制约因素,比较不同海拔樟子松的径向生长与气候因子的相关性,并探讨在气候变化背景下,大兴安 岭北部樟子松树木生长趋势及其对气候因子的响应。本研究将为大兴安岭地区生态环境保护与管理提供理 论基础,同时也为该区域的古气候重建研究提供重要的理论依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

选取大兴安岭山脉北部北岸林场为研究区域。大兴安岭山脉是中国最大、纬度最高、最原始的森林区之一,位于黑龙江省北部、内蒙古自治区东北部,地处欧亚大陆多年冻土区。该地区受西伯利亚冬季风和南上夏季风的共同影响,气候变化敏感性高,是中国东北重要的生态屏障和国家森林保育区。地理坐标介于43°—53.5°N,117.33°—126°E之间,山地总面积约32.72万km<sup>2</sup>,呈东北-西南走向,全长约1400km,宽200—400km,海拔200—1700m。以樟子松占优势的针叶林为主,主要分布在海拔400—1200m的范围内。这个地区的海拔高度和气候条件使得樟子松能够适应寒冷的气候和恶劣的生长环境。土壤类型主要有:棕色针叶林土、草甸土、灰黑土、暗棕壤和沼泽土。该地区是开展树木年轮气候学研究的理想地区。

1.2 树芯样本采集与树轮宽度年表建立

依据树木年代学基本原理<sup>[30]</sup>,于 2022 年 7 月末完成了在北岸林场范围内 3 个不同海拔高度(1150m、 900m 和 700m)、2023 年 7 月末完成了 2 个不同海拔高度(1200m 和 800m)的樟子松树轮样本采集工作。在 此研究中,每个取样地点均以核心区内的原始林为中心,尽可能选择无人为扰动的地区。在采集过程中,尽可 能选择肉眼观察到的树龄较大且长势较好的树木,利用生长锥在树干胸高处(离地面 1.3m),沿着不同的方 向,分别钻取 2—3 个树芯样本(生长锥口径为 10mm)。采样点信息见表 1。

根据树木年轮分析基本步骤[31],对已经完成自然风干的树轮样本进行固定、打磨和目测定年,使用

LINTAB6年轮宽度仪(Rinntech, Heidelberg, Germany, 精度为 0.001mm)来测量样芯的树轮宽度, 通过 PAST5 软件对测得的树轮宽度进行交叉定年, 结合 COFECHA 程序<sup>[32]</sup>对交叉定年结果进行质量检验, 剔除与主序列 相关性较差的样芯, 进入序列的样芯: 高海拔(ZH, 1200m)共 55 根/24 棵、中高海拔(ZM-H, 1150m)共 57 根/21 棵、中海拔(ZM, 900m)共 54 根/22 棵、中低海拔(ZM-L, 800 m)共 50 根/27 棵、低海拔(ZL, 700m)共 54 根/20 棵。最后, 通过 ARSTAN 年表研制程序<sup>[33]</sup>中的负指数函数去趋势方法拟合并去除树木生长趋势, 对去 趋势后的序列进行双权重平均, 得到树轮宽度标准化年表。

	表 1 大兴安岭北部 5 个海拔高度的樟子松采样点基本信息
Table 1	Information on sampling sites of <i>Pinus sylvestris</i> var, mongolica at five elevations in the northern Greater Khingan Mountain

	-				-	
采样点 Sampling point	高海拔 ZH	中高海拔 ZM-H	中海拔 ZM	中低海拔 ZM-L	低海拔 ZL	_
纬度 Latitude(N)	52.18°	52.19°	52.13°	52.14°	52.15°	_
经度 Longitude(E)	121.47°	121.47°	121.53°	121.52°	121.79°	
海拔 Average elevation/m	1200(±20)	$1150(\pm 20)$	900(±20)	$800(\pm 20)$	$700(\pm 20)$	
坡向 Slope direction	东南	东北	西南	南	西南	
坡度 Slope/(°)	5	5	30	5	30	
郁闭度 Canopy density	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	
样本量(树芯数/树数) Sample size (Number of cores/Number of trees)	55/24	60/21	58/22	53/27	55/20	

ZH:高海拔 High elevation;ZM-H:中高海拔 Medium\high elevation;ZM:中海拔 Medium elevation;ZM-L:中低海拔 Medium-low elevation;ZL:低 海拔 Low elevation

#### 1.3 气象资料

由于采样点附近没有气象站,使用 CRU TS 4.04 0.5°× 0.5°(http://climexp.knmi.nl)的格点数据来分析 樟子松的径向生长与气候关系。CRU 数据库由区域气象站的插值组成,在气象站密度较低的地区,CRU 数据 具有不均匀性<sup>[34]</sup>。因此,利用根河(50.47°N,121.31°E)、漠河(52.58°N,122.31°E)和呼中(52.02°N,123.34° E)气象站的观测数据以及三个站点的平均观测数据与 CRU 气候数据之间的相关性来验证 CRU 气候数据的 准确性。分析表明,CRU 数据与各气候站点数据之间的相关性均极高,且在 0.01 水平上具有显著性。因此, 认为该地区的 CRU 网格点数据是可信的。

由于 5 个采样点涵盖两个格点, 故选取 52.00°—52.50°N, 121.00°—121.50°E 和 52.00°—52.50°N, 121.50°—122.00°E 范围内的 0.5°×0.5°CRU 气候格点资料<sup>[35]</sup>, 取两格点气候数据的平均值来表征研究区域 气候变化背景。选择的气候要素为 1911—2020 年(5 个年表子样本信号强度 > 0.85 第一年的公共区间)的 平均气温(T)、平均最高气温( $T_{max}$ )、平均最低气温( $T_{min}$ )、降水量(P)和帕默尔干旱指数(PDSI),图 1 见研究 区域年内逐月降水量和气温状况。研究区年内逐月降水量和平均气温均呈单峰型分布,峰值出现时段相同均 为 7 月,且存在雨热同期以及较为明显的干湿季节,平均气温最高值为 16.92°C,降水量最高值为 114.16mm, 约占年降水量的 26.3%。年际气候变化特征显示,从 1911 年至今年降水量呈显著上升趋势(Y=0.426X-402.873, $R^2$ =0.048,P < 0.05),年平均气温呈极显著上升趋势(Y=0.017X-39.300, $R^2$ =0.371,P < 0.01)。

采用线性回归法分析了气候因素与树轮宽度年表之间的关系。用 Matlab 软件中的 Mann-Kendall(MK) 方法对气象数据进行突变检验。Mann-Kendall 检验法是一种用于确定长期时间序列因子趋势突变的方法,在 地理科学和大气科学中得到广泛应用。当 UF 和 UB 只有一个持续稳定的交点时,这表明 MK 突变检验结果 具有较高的稳定性和准确性,该交点即为突变点<sup>[36]</sup>。利用 Pearson 相关分析法将 5 个海拔高度的樟子松树轮 宽度年表与 *P*、*T*、*T*<sub>max</sub>、*T*<sub>min</sub>和 PDSI 进行相关,滑动相关分析通过 R 语言中的 treeclim 包完成。由于树木生长 对气候因素的反应存在滞后性,我们选择使用上年 10 月至当年 9 月的气象数据进行单月相关分析。



# Fig.1 Climatic characteristics of the northern Greater Khingan Mountains from 1911 to 2020

T:平均气温;T<sub>max</sub>:平均最高气温;T<sub>min</sub>:平均最低气温;P:降水量

# 2 结果与分析

## 2.1 年表特征

为更好地保留年表的低频气候信息,本研究建立了5个海拔樟子松的树轮宽度标准化年表(图2),并分 析了其主要特征参数。如表2所示,总体来看,中高海拔樟子松的各项参数值大多(一阶自相关、所有系列间 相关、样本间相关、树木间相关、信噪比和样本解释总量)均优于其他海拔,说明本研究区内5个海拔中中高 海拔樟子松(ZM-H)的年表质量可能最好,但其年表长度却最短,只有112年。5个海拔樟子松年表均表现出 较高的 EPS,表明这些年表均适合进行树木年轮气候学分析。

Table 2         Main characteristic parameters of tree ring width standardized chronology							
采样点 Sampling point	高海拔 7H	中高海拔 ZM-H	中海拔 ZM	中低海拔 ZM-I	低海拔 71		
	2.11	201-11	2.111	Zim-L	20		
半均敏感度 Mean sensitivity	0.157	0.115	0.110	0.206	0.231		
标准方差 Standard deviation	0.232	0.214	0.279	0.191	0.169		
一阶自相关 First-order auto correlation	0.771	0.957	0.802	0.455	0.501		
所有系列间相关 All series correlation	0.351	0.680	0.360	0.406	0.400		
样本间相关 Mean within-tree correlation	0.363	0.844	0.670	0.656	0.661		
树木间相关 Between-trees correlation	0.346	0.673	0.347	0.401	0.390		
信噪比 Signal-to-noise ratio	25.966	101.910	25.359	33.519	32.600		
样本解释总量 Expressed population signal	0.963	0.990	0.962	0.971	0.970		
子样本信号强度>0.85 的第一年 The first year of subsample signal strength > 0.85	1911	1910	1814	1837	1809		

#### 表 2 树轮宽度标准化表主要特征参数

### 2.2 气候因子及树木径向生长变化特征

M-K 检验结果如图 3 所示,表明年降水量没有出现任何突变,而年平均气温出现了由低到高的突变(1988年)。根据 M-K 突变检验结果,在气候突变点前后(1955—1987年和 1988—2020年),分别对年降水量、年平均气温以及树轮宽度指数进行对比分析,如图 4 所示。同时,计算了这两个时段各参数的平均值(表3)。从平均值可以看出,年平均气温上升了 0.809℃,降水量略有变化,升高了 9.174mm。在 5 个海拔樟子松的树轮宽度指数平均值中,只有中高海拔和中海拔的指数增加,其他 3 个海拔的指数均减小,而且中高海拔的





Fig.2 Standardized chronology of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* at five elevations in the northern Greater Khingan Mountains

SSS:子样本信号强度 Subsample signal strength; ZH:高海拔 High elevation; ZM-H:中高海拔 Medium-high elevation; ZM:中海拔 Medium elevation; ZM-L:中低海拔 Medium-low elevation; ZL:低海拔 Low elevation

变化幅度较大。如图 4 所示,年平均气温和年降水量在突变前后的变化均不显著;仅中海拔的树轮宽度指数 在突变前的变化趋势并不显著,其他 4 个海拔均呈显著下降趋势(*P* < 0.05),在突变后高海拔、中高海拔和中 海拔均呈极显著上升趋势(*P* < 0.01),而中低海拔和低海拔的树轮宽度指数在整个阶段均呈不显著下降 趋势。





**Fig.3 Results of Mann-Kendall tests for mean temperature and precipitation)** (1911—2020) UF:上升趋势;UB:下降趋势;α:显著性水平

http://www.ecologica.cn

#### 表 3 气温突变前后大兴安岭北部 5 个海拔高度树轮宽度标准化年表系数及气候因子的平均值

 Table 3
 The average standardized chronological coefficients of tree-ring width at five elevations and the climatic variables before and after the abrupt temperature change in the northern Greater Khingan Mountains

时段	年平均气温	年降水量	- 年表系数 Tree-ring index					
Time interval	Mean annual temperature∕℃	Annual – precipitation/mm	高海拔 ZH	中高海拔 ZM-H	中海拔 ZM	中低海拔 ZM-L	低海拔 ZL	
突变前 Before abrupt change	-5.079	440.858	0.980	0.493	0.790	1.012	1.013	
突变后 After abrupt change	-4.270	450.032	0.947	1.385	1.111	0.957	0.925	





#### 2.3 树轮宽度与气候因子相关关系

5个海拔高度樟子松的树轮宽度与气候因子的相关性(图 5)表明,在不同海拔樟子松的树轮宽度与气候 因子的关系呈现出各自的特性。具体来说,高海拔的径向生长与上年 10月 P 呈极显著负相关,与当年 9 月的 *T*<sub>min</sub>呈极显著正相关,与当年 1 月和 2 月的 P 呈显著负相关,与当年 9 月的 P 和上年 10 月的 *T*<sub>min</sub>均呈显著正 相关。中高海拔的径向生长与上年 10月、当年 5—9 月的 T、当年 7 月和 8 月的 *T*<sub>max</sub>、上年 10 月和当年 4—8 月的 *T*<sub>min</sub>均呈极显著正相关,与当年 3 月的 P 呈显著负相关,与当年 4 月的 T、上年 10月、当年 5 月和 6 月、9 月的 *T*<sub>max</sub>呈显著正相关。中海拔的径向生长与当年 5 月的 P、当年 5 月、8 月的 T、当年 5—8 月的 *T*<sub>min</sub>均呈极 显著正相关,与当年 6 月的 P、当年 7 月的 *T*<sub>min</sub>、当年 8 月的 *T*<sub>max</sub>均呈显著正相关。中低海拔的径向生长与当 年 5—6 月的 P 呈极显著正相关,与当年 7 月的 P 呈显著正相关,与当年 4 月、6 月的 T 和 *T*<sub>max</sub>、当年 9 月的 *T*<sub>max</sub>均呈显著负相关,与上年 10 月—当年 9 月的 PDSI 均呈极显著正相关。低海拔的径向生长与当年 5 月和 6月的 P 呈极显著正相关,与当年 4月、6月的 T 和 T<sub>max</sub>、当年 4月的 T<sub>min</sub>均呈极显著负相关,与当年 3月的 T 和 T<sub>max</sub>均呈显著负相关,与上年 10月—当年 9月的 PDSI 均呈极显著正相关(n=110)。



图 5 大兴安岭北部 5 个海拔高度的樟子松树轮宽度标准化年表与月气候因子之间的相关性

Fig.5 Correlation between standardized chronology of tree-ring width and monthly climate factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* at five elevations in the northern Greater Khingan Mountains

\*: P < 0.05, \*\*: P < 0.01; p: 上一年; c: 当年; PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer drought severity index

#### 2.4 气温突变前后树木径向生长的响应变化

根据图 6 中 5 个海拔樟子松树轮宽度年表与不同时间段单月气候因子的相关分析结果,可以看出高海拔的径向生长在突变前与当年 3 月的 P、上年 10 月的 T<sub>max</sub>、当年 5 月和 7 月的 PDSI 均呈显著正相关,在突变后与当年 1 月的 P 呈显著负相关,与当年 5 月的 T<sub>min</sub>呈显著正相关。中高海拔的径向生长与当年 3 月和 4 月的 T 和 T<sub>max</sub>、当年 4 月的 T<sub>min</sub>呈显著负相关,与上年 10 月的 T<sub>max</sub>呈显著正相关,在突变后与当年 5 —7 月的 T 呈显 著正相关,与当年 5 月的 T<sub>min</sub>呈极显著正相关。中海拔的径向生长在突变前与当年 4 月、6 月和 7 月的 P、上 年 12 月的气温、当年 9 月的 T<sub>min</sub>和上年 10 月—当年 9 月的 PDSI 均呈显著正相关,与当年 5 月 T 呈显著负相 关,在突变后与当年 5 月的 P 和 T 呈显著正相关,与当年 5 月的 T<sub>min</sub>呈极显著负相关,与当年 2 月的 T 和 T<sub>max</sub> 呈显著负相关。中低海拔的径向生长在突变前与当年 2 月的 P、当年 4 月、6 月、9 月的 T<sub>max</sub>均呈显著负相关, 与当年 5 月、9 月的 P 呈显著正相关,与当年 9 月的 T<sub>min</sub>和上年 10 月—当年 9 月的 PDSI 均呈极显著正相关, 有突变后与当年 1 月和 3 月的气温均呈显著负相关,与上年 11 月、12 月、当年 3 月、当年 5 —9 月的 PDSI 均呈 显著正相关。低海拔的径向生长在突变前与当年 4 —6 月的 P 呈极显著正相关,与当年 7 月的 P 呈显著正相 关,与当年 4 月 T 和 T<sub>max</sub>呈显著负相关,与当年 6 月的 T<sub>max</sub>呈极显著负相关,与上年 12 月、当年 1 月、3—9 月



的 PDSI 均呈显著正相关,在突变后与当年 6 月的 P 呈显著正相关,与当年 3 月的 T 和 T<sub>min</sub>呈极显著负相关, 与当年 3 月的 T<sub>max</sub>、当年 6 月的 T 和 T<sub>max</sub>呈显著负相关,与当年 5—9 月的 PDSI 均呈显著正相关(n=33)。

图 6 温度突变前后大兴安岭北部 5 个海拔高度的樟子松树轮宽度标准化年表与月气候因子的相关性分析 Fig.6 Correlation analysis between standardized chronology of tree-ring width and monthly climate factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* at five elevations in the northern Greater Khingan Mountains before and after abrupt temperature change

## 2.5 树轮宽度与气候因子的滑动相关分析

为了进一步准确反映不同海拔樟子松径向生长对气候变化响应的时间稳定性,计算了 1955—2020 年期 间各年表与 5 种气候因子的 31 年的滑动相关系数。从 5 个海拔樟子松树轮宽度年表与气候因子的滑动相关 分析结果(图 7)来看,不同海拔樟子松对气候因子的敏感度也会随着气温的升高而出现差异。高海拔和低海 拔的樟子松对气候因子的敏感性均减弱,中高海拔和中海拔樟子松对温度的敏感性增强,尤其是 *T*<sub>min</sub>,且中高 海拔强于中海拔。但中海拔樟子松对 PDSI 的敏感性减弱。中低海拔樟子松对降水和 PDSI 的敏感性均 减弱。





Fig.7 Results of moving correlation analysis between standardized chronology of tree-ring width and monthly climate factors of *Pinus* sylvestris var. mongolica at five elevations in the northern Greater Khingan Mountains

#### 3 讨论

相关性分析结果(图 5)表明,高海拔樟子松的径向生长与当年1月和2月的降水量以及中高海拔樟子松 与当年3月的降水量均呈显著负相关。如图1所示,研究区域3月份的平均最高气温低于零下5℃,此时的降 水类型为降雪。因此,生长季前期的融雪量大,根系开始生长的时间推迟,生长期缩短,影响树木生长<sup>[37]</sup>。高 海拔和中高海拔樟子松的径向生长与上年10月份的气温呈显著正相关。树木的生长受气温的影响,通常表 现为当年年轮宽度的变化与当年温度状况相对应。然而,有时也影响到次年树轮的宽窄,生理学上将此称之 为"滞后效应"[38]。温暖的秋季可以延长生长期,增加树木第二年的生长潜力,为树木在下一年的生长积累 养分,从而加快下一生长季的径向生长速度<sup>[39-42]</sup>。此外,在休眠芽形成的秋季(特别是 10 月),温度过低会 导致休眠芽数量减少,从而对第二年的年轮生长造成影响[27]。中高海拔樟子松的径向生长与当年整个生长 季(4—9月)的温度以及中海拔樟子松的径向生长与5—8月的温度均呈显著正相关。图1显示,研究地区的 樟子松生长季相对较短(5--8月),5月份的平均最低气温超过5℃(5.07℃),这恰好是树木生长的生理学温 度最低值[43]。此时,树木刚好处于生长初期,气温升高会加速积雪融化,提高土壤温度和土壤含水量,促进早 期木质细胞的分裂和生长[44-45],树木提早结束休眠状态。春季气温升高可促进更早的韧皮部活动,延长树木 的生长期并形成更宽的年轮<sup>[46-48]</sup>。而在树木生长过程中,当年生长季温度升高时,会对树木的光合作用、细 胞分裂和径向生长产生积极的影响,从而加快生长速度,形成更宽的年轮<sup>[44,47-49]</sup>。夏季是树木生长最旺盛的 季节,较高的气温有利于树木光合作用的发挥和光合产物的积累,从而对树木的生长起到促进作用<sup>[50]</sup>。这也 符合传统观点,即夏季温度是影响高海拔地区树木径向生长的关键气候因素<sup>[10]</sup>,这证明了高海拔地区的树木 生长含有较强的气温信号[51-53]。高海拔地区温暖的生长季节会促进树木的光合作用,因此,树木的径向生长 与生长季节的温度呈正相关。类似的夏季气温促进高海拔树木生长的结论在日本八甲田山脉高海拔地区的 岳桦(Betula ermanii)<sup>[54]</sup>、北美西部蛇山高海拔地区的长叶松树(Bristlecone pine)<sup>[51]</sup>、阿尔卑斯山高海拔地区 的欧洲云杉(Picea abies)<sup>[55]</sup>、中国东北长白山的岳桦<sup>[56]</sup>、滇西哈巴雪山地区的大果红杉(Larix potaninii var. macrocarpa)<sup>[57]</sup>和长苞冷杉<sup>[58]</sup>、罗霄山脉的南方铁杉(Tsuga chinensis)<sup>[9]</sup>和管涔山华北落叶松(Larix principisrupprechtii)<sup>[59]</sup>的树轮研究中均有报道。

中低海拔樟子松的径向生长与当年5-7月的降水量呈显著正相关,而与当年4月和6月的气温呈显著 负相关,低海拔樟子松的径向生长与当年和5-6月的降水量呈显著正相关,但与当年3月、4月和6月的平 均气温呈显著负相关。此外,两个海拔的樟子松均与上年10月—当年9月的 PDSI 呈极显著正相关。中海拔 樟子松的径向生长与当年 5-6 月的降水量呈显著正相关。这可能是由于树木开始生长的月份(4月),各种 生理活动开始随着气温的回升而有所恢复的缘故。但此时若升温太快或气温过高,会使土壤中存在的融雪水 分蒸发过大,造成树木的根系解冻较慢,从而使树木在初春时出现生理干旱,对树木生长不利<sup>[40]</sup>。在低海拔 地区,由于树木蒸腾需要从土壤中汲取大量的水分,6月正值樟子松的生长季,也是针叶树细胞分裂和生长的 时期。PDSI反映了降水和温度对土壤水分的综合影响,生长季充足的水分保证了树木的各项生理活动及光 合产物的蓄积,对树木生长有利<sup>[61]</sup>。生长季的高温加剧了树木的蒸腾作用,促使树木体内水分散失,并且高 温会使土壤水分蒸发<sup>[62]</sup>,造成干旱而影响樟子松的生长<sup>[63]</sup>,影响树木的生理活动,限制树木生长<sup>[64]</sup>。同时, 5-77月间充足的降水可弥补高温蒸发造成的水分损失,促进细胞分裂和伸长,使细胞变大、细胞壁变薄,有利 于树木生长<sup>[42,65]</sup>。这都说明了中低海拔和低海拔樟子松的径向生长均受到了干旱胁迫的抑制,使得研究区 内的气温和降水对树木生长的影响起到了交互作用。前人对中国塞罕坝地区<sup>[60]</sup>和呼伦贝尔沙地<sup>[67]</sup>的樟子 松、中国芦芽山<sup>[68]</sup>的华北落叶松以及东哈萨克斯坦南部北方森林<sup>[69]</sup>的西伯利亚落叶松(Larix sibirica)的结果 均得出树木径向生长与当年生长季的降水呈显著正相关,与温度呈显著负相关。同时,内蒙古呼伦贝尔沙 地<sup>[67]</sup>的樟子松、大兴安岭北部图里河地区<sup>[11]</sup>和大白山地区<sup>[70]</sup>的兴安落叶松(Larix gmelinii(Rupr.)Kuzen)的 研究中均得出,树木的径向生长与全年的帕尔干旱指数均呈显著正相关关系,这也与本文对中低海拔和低海 拔樟子松的分析结果一致。

气候和天气的改变可能会直接影响植物物候,例如生长速度、芽发育和开花,也能通过影响森林结构和动态产生间接影响<sup>[71]</sup>。这类生长趋势可能会在温度突破一定阈值时在研究区内逐渐形成高山林线,主要认为受到温度的影响,随着海拔的升高温度逐渐变低,在达到一定的低温值时,树木会停止生长,从而形成高山林线<sup>[72]</sup>。图5可知,高海拔的樟子松与生长季温度的正相关并没有发生随着海拔上升而逐渐增强的现象,仅与当年9月的平均最低气温存在极显著正相关关系。Qiang等<sup>[73]</sup>在对祁连山青海云杉的分析中表明,在2950m处,青海云杉针叶的气孔密度和针叶干重达到最大值,随着海拔的继续上升,这两个项指标的测定值均有所下

降。当海拔上升至森林上限时,这两个项指标的测定值均处于极低的水平,此时大气中二氧化碳浓度也降到 最低。这表明在森林上线处,青海云杉保持着较低的生理代谢水平,有利于树木在生长过程中最大限度地避 免了环境变化所带来的影响。同时,在野外采样工作中发现,1200m 处是本研究区的森林上限,超过该海拔之 后并没有树木的分布,可能此时的樟子松已经改变了对环境的生态适应策略。这一结果与勾晓华等<sup>[74]</sup>在对 祁连山中部青海云杉的研究中也得出了一致的结论。

随着气候变化,不同海拔高度的水热分配也发生了变化,而生长环境的变化又会对树木的生长产生影 响[13]。研究区气温突变(1988年)前后不同海拔高度的年轮指数变化趋势(图4)以及树轮宽度年表与气候 因子的相关性(图 6)显示,随着气温的升高,高海拔和中高海拔的树轮宽度由明显的下降趋势变为明显的上 升趋势,且增长率较高,均出现"生长分异"的现象。图6可知,气温突变后,高海拔、中高海拔和中海拔的径 向生长与当年5月的平均最低气温之间存在明显的正相关关系,而突变前并不显著。这是因为在水分相对充 足的林区,温度升高会加速土壤中水分的蒸发,从而提高光合速率[75],这也可能是3个海拔樟子松在气温突 变后树轮宽度指数呈极显著上升趋势的主要原因。张晴等[76]在东天山的研究中得出与本文一致的结果,在 气温突变后中海拔(2430m)西伯利亚落叶松与当年5月的平均最低气温呈显著正相关关系,且树轮宽度指数 同样也呈极显著上升趋势。滑动相关分析结果表明(图7),1988年后中高海拔和中海拔樟子松与1—9月气 温的相关性较高,但存在相关性不显著的月份,两者均与生长前期(2月)的温度呈显著正相关。较高的温度 可以增加植物的酶活性并促进土壤微生物的活性[77],树木开始更早地生长,并且具有更长的生长季节,增加 了树木的径向生长<sup>[78]</sup>。与5-8月气温呈显著正相关,生长季节的较高温度有利于光合作用,促进树木生长, 这可能是中高海拔和中海拔樟子松在 1988 年之后径向生长呈显著上升趋势的主要原因(图4),这也与上文 中提到的"气温突变后当年5月的平均最低气温是3个海拔樟子松在气温突变后树轮宽度指数呈极显著上升 趋势的主要原因"结果一致。然而,高温会增加植物的呼吸和蒸腾作用,使得植物的营养和水分大量消耗,导 致自身有机物质的累积减少[79-80],导致 1995—2005 年期间树种的径向生长与绝大多数的温度呈不显著负相 关。中海拔、中低海拔和低海拔樟子松对帕默尔干旱指数的敏感性均降低。生长季的土壤水分条件好,温度 适宜,会提高树木的光合速率,促进细胞的分裂和扩大,树木径向生长量增大,同时随着温度的升高,水分的蒸 发速率也升高,在低海拔地区,能够较少水分胁迫对树木生长的抑制作用,从而促进树木的生长[81],这可能也 是在气温突变后中海拔樟子松径向生长呈显著上升趋势以及中低海拔和低海拔樟子松径向生长下降趋势变 缓的主要原因。

气温和降水对樟子松生长的影响在 5 个海拔高度上有所不同。温度和降水与树轮年表之间的相关性均发生了正负转换的现象。如图 4 所示,1988年后的快速变暖增加了高海拔、中高海拔和中海拔的径向生长量,但减少了中低海拔和低海拔的径向生长量。随着海拔的降低,温度逐渐升高,当温度超过临界点时,持续变暖使得树木的生长速度减慢,而且对温度的敏感性也随之降低,从而树木生长对温度的响应呈现出倒"U"字形的关系,而不是持续性的响应关系<sup>[82]</sup>,这被称为"温度阈值效应"。例如,Salzer等<sup>[10]</sup>发现,20世纪 50年代后,美国加利福尼亚州白山海拔较低的狐尾松(*Bristlecone pine*)径向生长量呈下降趋势,而海拔较高的树木生长量较高。Zhu等<sup>[83]</sup>发现,1980年后的快速变暖促进了中国东北地区高海拔红豆杉(*Picea jezoensis* var. *microsperma*)的径向生长,而降低了低海拔树木的径向生长。

研究结果(图5)表明,树木的生长在很大程度上受到海拔高度的影响。随着海拔的升高,樟子松对温度 的反应由负转正,对降水的正反应减弱。海拔高的地方比海拔低的地方温度低,但海拔低的地方比海拔高的 地方降水多。温度对树木生长的抑制作用在高海拔地区较低,从而促进了树木的生长。生长季节温度升高会 加速融雪,使土壤升温更快,从而延长生长季节<sup>[84]</sup>。温暖的冬季可防止叶片受损并降低霜冻程度<sup>[85]</sup>。在低 海拔地区,生长季节的高降水量会提高光合速率,促进树木生长。这一时期的高温可能会导致蒸散量增加和 水分缺失,从而减少树木的生长<sup>[85]</sup>。因此,高海拔地区树木的生长主要受生长季节温度的限制,而低海拔地 区树木的生长主要受水分的限制。除林线上限(1200m)的樟子松对温度的响应外,温度对树木径向生长的影 响在中低海拔地区从正相关变为负相关,而降水对树木径向生长的影响在中高海拔地区从正相关变为负相关。本研究认为,温度对树木生长的影响在海拔 800—900m 时由正相关变为负相关,降水对树木生长的影响 在海拔 900—1150m 时由正相关变为负相关。该阈值可为大兴安岭地区的森林保护和管理提供科学依据。

#### 4 结论

大兴安岭北部满归地区樟子松除了高海拔(森林上线)对环境的生态适应策略发生了变化以外,其余海 拔樟子松的径向生长与气候因子的关系具有"海拔效应"的特征,海拔对该山区树木生长模式的影响至关重 要。中高海拔和中海拔樟子松的主要限制因子为生长季的温度,尤其是平均最低温度,中低海拔和低海拔樟 子松均受温度和降水的共同影响,且中低海拔和低海拔樟子松受干旱胁迫的影响较为严重。随着海拔的降 低,温度对樟子松的径向生长由促进作用逐渐转为抑制作用,而降水是由抑制作用逐渐转为促进作用。随着 气温突变的发生,高海拔、中高海拔和中海拔樟子松的树轮宽度显著增加,但中低海拔和低海拔樟子松的径向 生长变化并不显著。其中,当年5月的平均最低气温是高海拔、中高海拔和中海拔树轮宽度增加的主要原因。 然而,仍需要对不同海拔地区的树木生长进行更多的研究,以提高对樟子松的生长与气候关系的认识,并为树 木生长对气候变化的响应提供更多的见解。

#### 参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis, 2021.
- [2] Vasseur D A, DeLong J P, Gilbert B, Greig H S, Harley C D G, McCann K S, Savage V, Tunney T D, O'Connor M I. Increased temperature variation poses a greater risk to species than climate warming. Proceedings Biological Sciences, 2014, 281(1779): 20132612.
- [3] 李腾,何兴元,陈振举.东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应——以千山为例.应用生态学报,2014,25(7):1841-1848.
- [4] Peng J F, Li J R, Li J B, Li X, Cui J Y, Peng M, Huo J X, Yang L. A tree-ring-based assessment of *Pinus armandii* adaptability to climate using two statistical methods in Mt. Yao, central China during 1961-2016. Forests, 2021, 12(6): 780.
- [5] Wilmking M, D'Arrigo R, Jacoby G C, Juday G P. Increased temperature sensitivity and divergent growth trends in circumpolar boreal forests. Geophysical Research Letters, 2005, 32(15):291-310.
- [6] Panthi S, Bräuning A, Zhou Z K, Fan Z X. Growth response of Abies georgei to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China. Dendrochronologia, 2018, 47: 1-9.
- [7] Benito D M, del Río M, Cañellas I. Black pine (*Pinus* nigra Arn.) growth divergence along a latitudinal gradient in Western Mediterranean Mountains. Annals of Forest Science, 2010, 67(4): 401.
- [8] Zhang T W, Zhang R B, Jiang S X, Bagila M, Ainur U, Yu S L. On the 'divergence problem' in the alatau mountains, central Asia: a study of the responses of schrenk spruce tree-ring width to climate under the recent warming and wetting trend. Atmosphere, 2019, 10(8): 473.
- [9] 王兆鹏, 张同文, 袁玉江, 张瑞波, 喻树龙, 刘蕊, 石仁娜・加汗, 郭冬, 王勇辉. 罗霄山南部4个针叶树种生长特征及其气候响应对比 分析. 植物生态学报, 2021, 45(12): 1303-1313.
- [10] Salzer M W, Hughes M K, Bunn A G, Kipfmueller 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.
- [11] 孙振静,赵慧颖,朱良军,李宗善,张远东,王晓春.大兴安岭北部不同降水梯度下兴安落叶松生长对升温的响应差异.北京林业大学学报,2019,41(6):1-14.
- [12] Jevšenak J, Džeroski S, Levanič T. Predicting the vessel lumen area tree-ring parameter of *Quercus robur* with linear and nonlinear machine learning algorithms. Geochronometria, 2018, 45(1); 211-222.
- [13] Fritts H C. Tree Rings and Climate; Academic Press, 1976: 268-273, 295-300.
- [14] Fritts H C, Smith D G, Cardis J W, Budelsky C A. Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona. Ecology, 1965, 46 (4): 393-401.
- [15] 曹宗英,勾晓华,刘文火,高琳琳,张芬.祁连山中部青海云杉上下限树轮宽度年表对气候的响应差异.干旱区资源与环境,2014,28 (7):29-34.
- [16] 石仁娜・加汗, 张同文, 喻树龙, 姜盛夏, 许仲林. 天山不同海拔雪岭云杉径向生长对气候变化的响应. 干旱区研究, 2021, 38(2): 327-338.
- [17] Affolter P, Büntgen U, Esper J, Rigling A, Weber P, Luterbacher J, Frank D. Inner Alpine conifer response to 20th century drought swings.

European Journal of Forest Research, 2010, 129(3): 289-298.

- [18] Koprowski M. Long-term increase of March temperature has no negative impact on tree rings of European larch (*Larix decidua*) in lowland Poland. Trees, 2012, 26(6): 1895-1903.
- [19] Sidor C G, Popa I, Vlad R, Cherubini P. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (*Romania*). Trees, 2015, 29(4): 985-997.
- [20] Liang E Y, Wang Y F, Xu Y, Liu B, Shao X M. Growth variation in *Abies georgei* var. smithii along altitudinal gradients in the Sygera Mountains, southeastern Tibetan Plateau. Trees, 2010, 24(2): 363-373.
- [21] White P B, Soulé P, van de Gevel S. Impacts of human disturbance on the temporal stability of climate-growth relationships in a red spruce forest, southern Appalachian Mountains, USA. Dendrochronologia, 2014, 32(1): 71-77.
- [22] Yang B, He M H, Melvin T M, Zhao Y, Briffa K R. Climate control on tree growth at the upper and lower treelines: a case study in the Qilian Mountains, Tibetan Plateau. PLoS One, 2013, 8(7): e69065.
- [23] Lyu L X, Deng X, Zhang Q B. Elevation pattern in growth coherency on the southeastern Tibetan Plateau. PLoS One, 2016, 11(9): e0163201.
- [24] 贺伟,布仁仓,熊在平,胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.
- [25] Li Y Y, Liu H Y, Zhu X R, Yue Y Y, Xue J X, Shi L. How permafrost degradation threatens boreal forest growth on its southern margin? The Science of the Total Environment, 2021, 762: 143154.
- [26] Liu P, Hu S Y, Wei H X, He W T, Zhou Y M, Wang Y T. Response of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* of different stand ages to climate and extreme drought events in the semi-arid region of western Liaoning, Northeast China. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1272477.
- [27] 王晓春, 宋来萍, 张远东. 大兴安岭北部樟子松树木生长与气候因子的关系. 植物生态学报, 2011, 35(3): 294-302.
- [28] Wen S, Shi Z J, Zhang X, Pan L L, Kwon S, Li Y H, Yang X H, Li H Z. Effect of climate and competition on radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in Hulunbuir sandy land of inner Mongolia, China. Plants, 2023, 12(13): 2584.
- [29] 包光, 刘治野, 刘娜, 吴买利. 呼伦贝尔沙地樟子松径向生长特征的 VS 模型模拟分析. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3448-3458.
- [30] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating. Tucson: University of Arizona Press, 1968.
- [31] Speer J H. Fundamentals of tree-ring research. Tucson: University of Arizona Press, 2010.
- [32] Holmes R L. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement, Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [33] Cook E. A time series analysis approach to tree-ring standardization [D]. Tucson: University of Arizona, 1985.
- [34] McAfee S, Guentchev G, Eischeid J. Reconciling precipitation trends in Alaska: 2. Gridded data analyses. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(24): 13820-13837.
- [35] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [36] 孔锋. 1.5℃温控目标背景下地球工程对中国不同区域气温影响的预估研究. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 511-525.
- [37] Shao X M. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha, Qinghai. Science in China Series D, 2005, 48 (7): 939.
- [38] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [39] Gou X, Chen F H, Yang M X, Gordon J, Fang K Y, Tian Q H, Zhang Y. Asymmetric variability between maximum and minimum temperatures in Northeastern Tibetan Plateau: evidence from tree rings. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51: 41-55.
- [40] Zhang T W, Yuan Y J, Liu Y, Wei W S, Zhang R B, Chen F, Yu S L, Shang H M, Qin L. A tree-ring based temperature reconstruction for the Kaiduhe River watershed, northwestern China, since A.D. 1680: Linkages to the NorthAtlantic Oscillation. Quaternary International, 2013, 311: 71-80.
- [41] Zhang T W, Huang L P, Zhang R B, Gao Y Q, Hu D Y, Yu S L, Jiang S X. The impacts of climatic factors on radial growth patterns at different stem heights in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*). Trees, 2020, 34(1): 163-175.
- [42] 杨柳,李静茹,彭剑峰,霍嘉新,陈亮. 1801 年以来河南尧山地区油松高温变化及影响机制. 生态学报, 2021, 41(1): 79-91.
- [43] Vaganov E, Hughes M, Shashkin A. Growth dynamics of conifer tree rings: images of past and future environments. Ecological Studies, 2006, 183.
- [44] Shi J F, Cook E R, Li J B, Lu H Y. Unprecedented January-July warming recorded in a 178-year tree-ring width chronology in the Dabie Mountains, southeastern China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 381/382; 92-97.
- [45] Måren I E, Karki S, Prajapati C, Yadav R K, Shrestha B B. Facing north or south: does slope aspect impact forest stand characteristics and soil properties in a semiarid trans-Himalayan valley? Journal of Arid Environments, 2015, 121: 112-123.
- [46] Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Carraro V. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. Oecologia, 2007, 152(1): 1-12.

- [47] Kujansuu J, Yasue K, Koike T, Abaimov A P, Kajimoto T, Takeda T, Tokumoto M, Matsuura Y. Climatic responses of tree-ring widths of Larix gmelinii on contrasting north-facing and south-facing slopes in central Siberia. Journal of Wood Science, 2007, 53(2): 87-93.
- [48] 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.
- [49] Begum S, Kudo K, Rahman M H, Nakaba S, Yamagishi Y, Nabeshima E, Nugroho W D, Oribe Y, Kitin P, Jin H O, Funada R. Climate change and the regulation of wood formation in trees by temperature. Trees, 2018, 32(1): 3-15.
- [50] Yu D P, Wang G G, Dai L M, Wang Q L. Dendroclimatic analysis of *Betula ermanii* forests at their upper limit of distribution in Changbai Mountain, Northeast China. Forest Ecology and Management, 2007, 240(1): 105-113.
- [51] Barichivich J, Sauchyn D J, Lara A. Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: responses to regional and large-scale variability. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 281(3/4): 320-333.
- [52] Kraus C, Zang C, Menzel A. Elevational response in leaf and xylem phenology reveals different prolongation of growing period of common beech and Norway spruce under warming conditions in the Bavarian Alps. European Journal of Forest Research, 2016, 135(6): 1011-1023.
- [53] He M H, Shishov V, Kaparova N, Yang B, Bruning A, Grieinger J. Process-based modeling of tree-ring formation and its relationships with climate on the Tibetan Plateau. Dendrochronologia, 2017, 42: 31-41.
- [54] Takahashi K, Tokumitsu Y, Yasue K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, central Japan. Ecological Research, 2005, 20(4): 445-451.
- [55] Meyer F D, Bräker O U. Climate response in dominant and suppressed spruce trees, *Picea abies*(L.) Karst., on a subalpine and lower montane site in Switzerland. Écoscience, 2001, 8(1): 105-114.
- [56] Wang X M, Zhao X H, Gao L S. Climatic response of *Betula ermanii* along an altitudinal gradient in the northern slope of Changbai Mountain, China. Dendrobiology, 2013, 70: 99-107.
- [57] 张贇, 尹定财, 田昆, 肖德荣, 孙梅, 王行, 张卫国. 滇西北海拔上限大果红杉径向生长对气候变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28 (9): 2805-2812.
- [58] 张贇, 尹定财, 张卫国. 滇西北哈巴雪山不同海拔长苞冷杉径向生长对气候变化的响应. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6778-6783.
- [59] 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.
- [60] 张先亮,崔明星,马艳军,吴涛,陈振举,丁玮航.大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系.应用生态学报,2010,21(10):2501-2507.
- [61] Bonan G B, Sirois L. Air temperature, tree growth, and the northern and southern range limits to *Picea mariana*. Journal of Vegetation Science, 1992, 3(4): 495-506.
- [62] Vieira J, Rossi S, Campelo F, Freitas H, Nabais C. Seasonal and daily cycles of stem radial variation of *Pinus pinaster* in a drought-prone environment. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 180: 173-181.
- [63] Lévesque M, Siegwolf R, Saurer M, Eilmann B, Rigling A. Increased water-use efficiency does not lead to enhanced tree growth under xeric and mesic conditions. New Phytologist, 2014, 203(1): 94-109.
- [64] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [65] 彭剑峰,勾晓华,陈发虎,刘普幸,张永,方克艳. 阿尼玛卿山地不同海拔青海云杉(*Picea crassifolia*)树轮生长特性及其对气候的响应. 生态学报, 2007, 27(8): 3268-3276.
- [66] 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.
- [67] 尚建勋,时忠杰,高吉喜,徐丽宏,吕世海,冯朝阳,王鲁秀.呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.生态学报,2012,32 (4):73-80.
- [68] 张文涛, 江源, 董满宇, 杨艳刚, 杨浩春. 芦芽山不同海拔华北落叶松径向生长与气候因子关系的研究. 北京师范大学学报: 自然科学 版, 2011, 47(3): 304-309.
- [69] Dulamsuren C, Wommelsdorf T, Zhao F J, Xue Y Q, Zhumadilov B Z, Leuschner C, Hauck M. Increased summer temperatures reduce the growth and regeneration of *Larix sibirica* in southern boreal forests of eastern Kazakhstan. Ecosystems, 2013, 16(8): 1536-1549.
- [70] 阎弘,孙滢洁,周婉莹,刘滨辉.大兴安岭不同纬度兴安落叶松生长对干旱适应性及生长衰退的差异,生态学报,2023,43(10): 3958-3970.
- [71] Loehle C, LeBlanc D. Model-based assessments of climate change effects on forests: a critical review. Ecological Modelling, 1996, 90 (1): 0304380096837094.
- [72] Oberhuber W. Influence of climate on radial growth of Pinus cembra within the alpine timberline ecotone. Tree Physiology, 2004, 24(3): 291-301.
- [73] Qiang W Y, Wang X L, Chen T, Feng H Y, An L Z, He Y Q, Wang G. Variations of stomatal density and carbon isotope values of Picea

crassifolia at different altitudes in the Qilian Mountains. Trees, 2003, 17(3): 258-262.

- [74] 勾晓华,陈发虎,杨梅学,彭剑峰,强维亚,陈拓.祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化.生态学报,2004,24(1): 172-176.
- [75] 彭剑峰,勾晓华,陈发虎,李金豹,刘普幸,田沁花,张永,张永香.天山东部西伯利亚落叶松树轮生长对气候要素的响应分析.生态学报,2006,26(8):2723-2731.
- [76] 张晴,于瑞德,郑宏伟,杨美琳,甘森.天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析.植物研究,2018,38(1):14-25.
- [77] 唐国勇,张春华,刘方炎,李昆,马艳.季节非对称升温对喀斯特土壤 CO,释放的影响.环境科学, 2018, 39(4): 1962-1970.
- [78] Bhuta A A R, Kennedy L M, Pederson N. Climate-radial growth relationships of northern latitudinal range margin longleaf pine (*Pinus palustrisP. mill.*) in the Atlantic coastal plain of southeastern *Virginia*. Tree-Ring Research, 2009, 65(2): 105-115.
- [79] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Li J B, D'Arrigo R, Cook E, Yang T, Liu W H, Zhang F. Tree growth and time-varying climate response along altitudinal transects in central China. European Journal of Forest Research, 2010, 129(6): 1181-1189.
- [80] 赵志江,郭文霞,康东伟,崔莉,赵联军,李俊清.川西亚高山岷江冷杉和紫果云杉径向生长对气候因子的响应.林业科学,2019,55 (7):1-16.
- [81] Wu X C, Liu H Y, Wang Y F, Deng M H. Prolonged limitation of tree growth due to warmer spring in semi-arid mountain forests of Tianshan, Northwest China. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 024016.
- [82] Gurner R. Physiology of woody plants. Pacific Conservation Biology, 1998, 4: 272.
- [83] Zhu L J, Cooper D J, Yang J W, Zhang X, Wang X C. Rapid warming induces the contrasting growth of Yezo spruce (*Picea jezoensis* var. microsperma) at two elevation gradient sites of Northeast China. Dendrochronologia, 2018, 50: 52-63.
- [84] Carrer M, Nola P, Eduard J L, Motta R, Urbinati C. Regional variability of climate-growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. Journal of Ecology, 2007, 95(5): 1072-1083.
- [85] Wang T, Ren H B, Ma K P. Climatic signals in tree ring of *Picea schrenkiana* along an altitudinal gradient in the central Tianshan Mountains, northwestern China. Trees, 2005, 19(6): 736-742.