

# 大兴安岭温度梯度下兴安落叶松径向生长对气候的响应差异

李文超<sup>1,2</sup>, 张秋良<sup>1,2</sup>, 郝帅<sup>1,2</sup>, 杨婧雯<sup>1,2</sup>, 程蕾蕾<sup>1,3</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古 根河 022350; 3. 山西省五台山风景区管理委员会, 山西 忻州 035500)

**摘要:**为探究兴安落叶松温度梯度下径向生长调控因素的异同及其对气候变暖的响应,以绰源(-2.29℃)、乌尔其汉(-4.15℃)、上央气(-4.61℃)和满归(-5.25℃)为研究区域,基于树木年轮理论与方法,分析径向生长对气候的响应差异。结果表明:水分对树木生长的影响高于温度,仅上央气样点树木生长受到夏季温度(%incMSE<sub>TEM-SUM</sub> = 10.83;  $R^2 = 0.14$ ,  $P < 0.001$ )的抑制作用;夏季帕默尔干旱指数对绰源和上央气树木生长的重要性分别为8.8和11.9,春季潜在蒸散发对乌尔其汉树木生长的重要性为19.8;气候因子间交互作用解释了上央气和满归树木生长变化的14.8%和4.5%,且随着气候变暖,可利用水分对两区域树木生长越来越重要。研究明确了水分是大兴安岭兴安落叶松径向生长的主要驱动因素,并随着升温加剧,可利用水分对低温区域的树木生长更重要。

**关键词:**温度梯度;兴安落叶松;树木年轮;气候变暖;随机森林

中图分类号:S791.222 文献标识码:A 文章编号:1007-4066(2023)01-01-08

## Response Difference for Radial Growth of *Larix gmelinii* to Climate Factors under Temperature Gradient in the Greater Xing'an Mountains

LI Wenchao<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiuliang<sup>1,2</sup>, HAO Shuai<sup>1,2</sup>, YANG Jingwen<sup>1,2</sup>, CHENG Leilei<sup>1,3</sup>

(1. Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. The Greater Xing'an Mountains Forest Ecosystem National Field Scientific Observation Research Station, Inner Mongolia, Genhe 022350, China; 3. Wutai Mountain Scenic Area Management Committee, Shanxi, Xinzhou 035500, China)

**Abstract:** In order to explore the similarities and differences between the radial growth regulation factors under temperature gradient and their response to climate warming, the difference of radial growth to climate was studied based on the theory and method of tree rings, with taking Chaoyuan (-2.29℃), Wuerqihan (-4.15℃), Shangyangqi (-4.61℃) and Mangui (-5.25℃) as research area. The results showed that the influence of water on radial growth was stronger than that of temperature, and the summer temperature significantly inhibited tree radial growth (%incMSE<sub>TEM-SUM</sub> = 10.83;  $R^2 = 0.14$ ,  $P < 0.001$ ) in Shangyangqi sample site. The importance of PSDI in summer to tree growth in Chaoyuan and Shangyangqi sample site was 8.8 and 11.9, the importance of potential evapotranspiration in spring to tree growth in Wuerqihan was 19.8. The interaction effect of climate factors intensely impacted tree growth in Chaoyuan and Mangui sample site, which could explained 14.8% and 4.5% of the variance in tree growth, respectively, and as climate warming, available water was more important to tree growth in these two areas. Water was the main driving factor for radial growth of *Larix gmelinii* in the Greater Xing'an Mountains. As climate warming, available water became more important to tree growth in lower temperature area.

**Key words:** temperature gradient; *Larix gmelinii*; tree ring; climate warming; random forest

在过去的几十年中,森林约固定了二氧化碳排放量的三分之一,是陆地上主要的碳汇生态系统<sup>[1-2]</sup>。森林生态系统大约覆盖了陆地表面的31%,在调节全球碳、水和能量循环以及缓解全球变暖方面发挥着关键的生态作用<sup>[3]</sup>。然而,由全球气

候变暖引起的干旱事件已经导致树木生长衰退甚至死亡,不仅改变了森林生态系统组成和结构,也限制了其生态功能。1961—2010年,中国平均气温以0.275℃/10a速度增加,总降水量以0.254mm/10a速度增加;中国东北地区增温趋势尤其明显,平均气

收稿日期:2023-01-04

修回日期:2023-02-09

资助项目:内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外观测研究站科技资源共享服务平台项目(RZ2000001899);国家自然科学基金(42207507)

作者简介:李文超(1995—),男(蒙古族),内蒙古通辽人,研究生,从事树木年轮学研究。E-mail:lwc5219@163.com

通信作者:张秋良(1960—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,从事森林可持续经营理论与技术、森林生态研究。E-mail:zql@mail@imau.edu.cn

温以 0.343 °C/10 a 增加,而降水以 4.448 mm/10 a 速度降低<sup>[4]</sup>。大兴安岭是对气候变化最敏感地区之一,自 20 世纪 80 年代以来呈显著增温趋势<sup>[5-6]</sup>,气候变暖使该地区树木生长面临严峻挑战。

兴安落叶松(*Larix gmelinii*)具有耐寒抗旱、适应能力强、寿命长等特点,是大兴安岭林区重要树种<sup>[7]</sup>。已有研究证明了温度是大兴安岭林区兴安落叶松径向生长的主要限制因子,降水对兴安落叶松径向生长影响较弱<sup>[8-9]</sup>。但是,也有研究表明 2 月以及夏季可利用水分显著促进兴安落叶松径向生长,并且仅 3 月平均温度显著抑制树木生长<sup>[10-11]</sup>。温度对兴安落叶松抑制作用主要发生在大兴安岭北部区域,而南部区域主要受到可利用水分促进作用<sup>[11-12]</sup>。在降水梯度下,温度对树木生长限制作用也具有明显差异。在低降水和中度降水区域兴安落叶松径向生长主要受到生长季和前一年 9 月最低温抑制作用;在高降水区域,树木生长主要受到平均温度和最低温共同限制作用<sup>[8]</sup>。

兴安落叶松径向生长驱动因素随着升温而发生改变,并出现“气候分异”,即在温度限制的高纬度和高海拔地区,树木生长并未受到气候变暖的促进作用,而是由温度限制转变为水分限制<sup>[13-15]</sup>。在气候变暖背景下,温度仍然是落叶松径向生长限制因素,但随着升温加剧,限制作用逐渐减弱;反而由于高温引起的区域暖干化使土壤水分成为限制落叶松径向生长的主要因子<sup>[9-10]</sup>。气候变化改变了生长与气候的关系,并且存在明显空间差异。例如在低降水区域,生长季降水对兴安落叶松促进作用逐渐减弱;在中、高降水地区,生长季降水对树木生长促进作用逐渐增强<sup>[9]</sup>。

为探究在温度梯度下兴安落叶松径向生长驱动因素的异同,以及气候变暖背景下主要驱动因素变化特征,本研究以大兴安岭 4 个采样点的兴安落叶松为对象,确定其径向生长主要控制因素,揭示生长与气候关系时空变化规律,以期为预测气候变化背景下寒温带树木生长过程以及森林资源保护和管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国北方大兴安岭地区,属典型寒温带大陆性季风气候。区内以寒区环境为主并多分布有冻土层,山脉狭长且由高到低呈西南至东北走向,地形复杂多样,致使气候条件区域性差异明显。区内土壤以棕色针叶林土、草甸土、沼泽土和石质土为主。大兴安岭林区属于欧亚针叶林区沿山地向南

的延伸,地带性植被以兴安落叶松为主,集中于山地和山体主脉两侧。与兴安落叶松混生的其他乔木树种主要包括樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等。灌木树种主要包括柴桦(*Betu fruticosa*)、杜香(*Rhododendron tomentosum*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)。

本研究由南向北沿温度梯度设置 4 个采样点,绰源、乌尔其汉、上央气以及满归,海拔范围 707~1 045 m(表 1)。年平均温度依次为 -2.29 °C、-4.15 °C、-4.61 °C 和 -5.25 °C,并具有明显的上升趋势;年总降水量分别为 464.5 mm、492.1 mm、492.6 mm 以及 476.1 mm。4 个采样点最暖月份均为 7 月(15.6~16.9 °C);降水均集中在 6—8 月,占全年总降水的 65.2%~70.1%。

表 1 兴安落叶松采样点信息

Tab.1 Information of sampling sites of *Larix gmelinii*

采样点信息	绰源	乌尔其汉	上央气	满归
经度(E)	121°23'42"	121°45'35"	121°31'53"	122°15'09"
纬度(N)	48°18'27"	49°28'30"	51°05'32"	52°16'22"
海拔/m	1 015	1 045	957	707
年平均温度/°C	-2.29	-4.15	-4.61	-5.25
郁闭度	0.7	0.6	0.8	0.5
平均树高/m	18.7	20.6	21.5	17.5
平均胸径/cm	36.5	38.7	39.3	35.4
林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	158	134	165	189
乔木组成	5 兴安落叶松 4 白桦 1 山杨	5 兴安落叶松 2 白桦 2 樟子松 1 蒙古栎	6 兴安落叶松 1 白桦 3 樟子松	6 兴安落叶松 2 白桦 2 樟子松
灌木组成	7 杜香 3 杜鹃	6 杜香 4 杜鹃	7 杜香 3 杜鹃	4 柴桦 3 杜香 3 杜鹃

### 1.2 树轮样本采集与年表建立

野外采样工作于 2021 年 6 月进行。选择无人干扰的兴安落叶松天然林,使用内径为 5.15 mm 的生长锥在胸高 1.3 m 处钻取生长芯,每棵树采集 1 根样芯,记录每株树木所处的生长环境,共获取 280 根样芯。在实验室对所有树木年轮样芯进行晾干、固定、打磨等处理<sup>[16]</sup>,在目视显微镜下交叉定年,使用 LINTAB 5 年轮宽度测量仪测量每根样芯的年轮宽度(精度为 0.01 mm),使用 COFFCHA 程序对定年和测量结果校正<sup>[17]</sup>,通过 ARSTAN 程序采用负指

数函数或线性函数去除非气候因素和树木生长趋势的影响,使用双权重平均对年轮曲线进行标准化,最

终建立 4 个采样点的年表。本研究使用标准年表进行后续分析(图 1、表 2)。

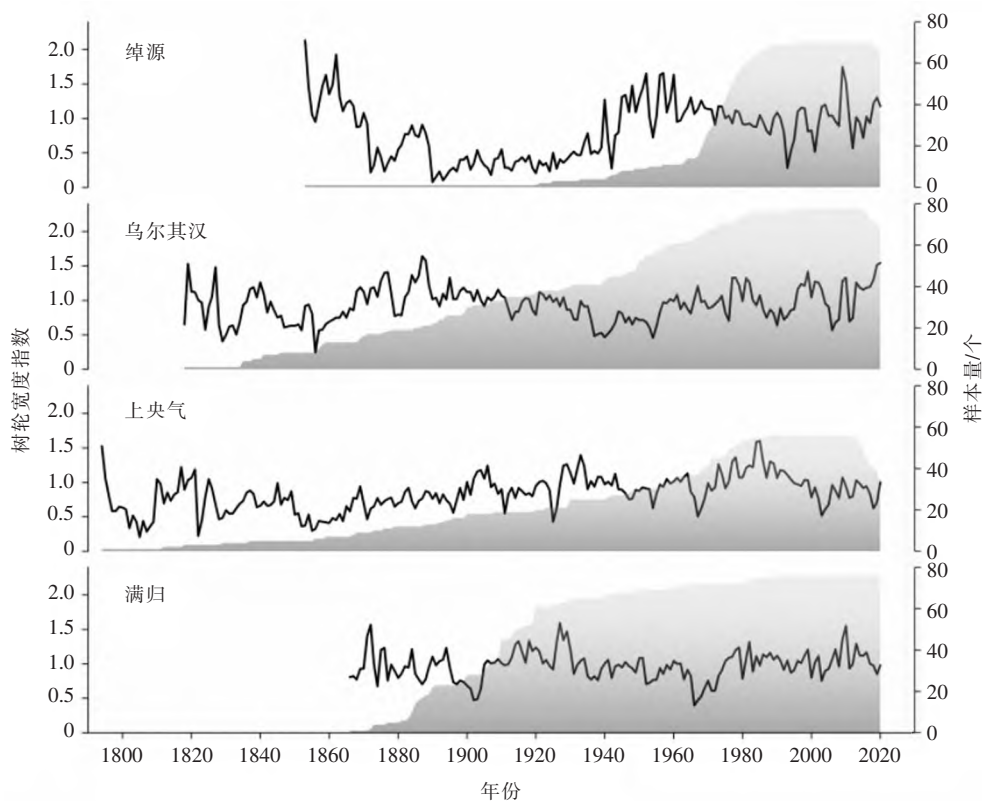


图 1 兴安落叶松树轮宽度指数及样本量变化特征

Fig.1 Change characteristics of tree-ring width index and sample size of *Larix gmelinii*

表 2 兴安落叶松标准年表统计特征  
Tab.2 Statistical characteristics of standard chronology of *Larix gmelinii*

标准年表参数	绰源	乌尔其汉	上央气	满归
样本量/个	70	78	56	76
时间跨度/年	1853—2020	1818—2020	1794—2020	1866—2020
标准偏差	0.59	0.30	0.28	0.23
平均敏感度	0.27	0.18	0.19	0.16
信噪比	18.62	15.07	6.61	9.75
样本总体代表性	0.95	0.94	0.87	0.90
一阶自相关系数	0.67	0.66	0.74	0.62
第一特征根解释量/%	43.45	37.62	32.55	28.90

### 1.3 气候数据获取与处理

本研究选择的气候因素包括温度(Temperature, TEM)、降水(Precipitation, PRE)、潜在蒸散发(Potential evapotranspiration, PET)以及帕默尔干旱指数(Palmer

Drought Severity Index, PDSI)。潜在蒸散发是指在水分饱和和条件下,下垫面可能达到的最大蒸散量,是反映当地水热条件的重要因素<sup>[18]</sup>。温度、降水和潜在蒸散发数据下载自国家青藏高原科学数据中心的 1 km 高分辨率气候数据集<sup>[19]</sup>。帕默尔干旱指数数据来自荷兰皇家气象研究所数据共享网站(<http://climexp.knmi.nl>),空间分辨率为 0.5°× 0.5°。下载 4 个采样点所对应的格点气候数据,所有气候数据时间段均为 1919—2020 年(图 2)。本研究设定前一年 12 月至当年 2 月为冬季(WIN),3—5 月为春季(SPR),6—8 月为夏季(SUM),9—11 月为秋季(AUT),使用各季节气候数据进行后续分析。

### 1.4 统计分析

通过随机森林模型(Random Forest)判定各季节气候因子对树木生长的重要性。随机森林模型是 Breiman<sup>[20]</sup>首次提出的集成学习决策树模型,已经被广泛应用于森林生态学的研究中。ntree 和 mtry 是随机森林运行过程中两个重要参数。ntree 是随机森林中决策树的个数,默认值为 500,为确保计算结果的可靠性,本研究将其设置为 800;mtry 通常为预测变量总数的三分之一,本研究中 mtry 值设置为 4。每一个采样均建立单独的随机森林模型,通过计算因子重要性及其显著水平最终确定兴安落叶松径向生长的主要影

响因素。通过回归分析确定主要影响因素对径向生长的正/负作用。基于变差分解定量温度、降水、潜在蒸散发和帕默尔干旱指数对径向生长的交互作用<sup>[21]</sup>。基于滑动相关分析确定主要影响因素对径向生长影响的

时间变化特征。随机森林模型和变差分解分别使用 R 语言中 *rfPermute* 和 *vegan* 程序包完成,回归分析使用 Origin 2016 完成;滑动相关分析在 Dendroclim 2002 软件进行;所有图形制作在 Origin 2016 中完成。

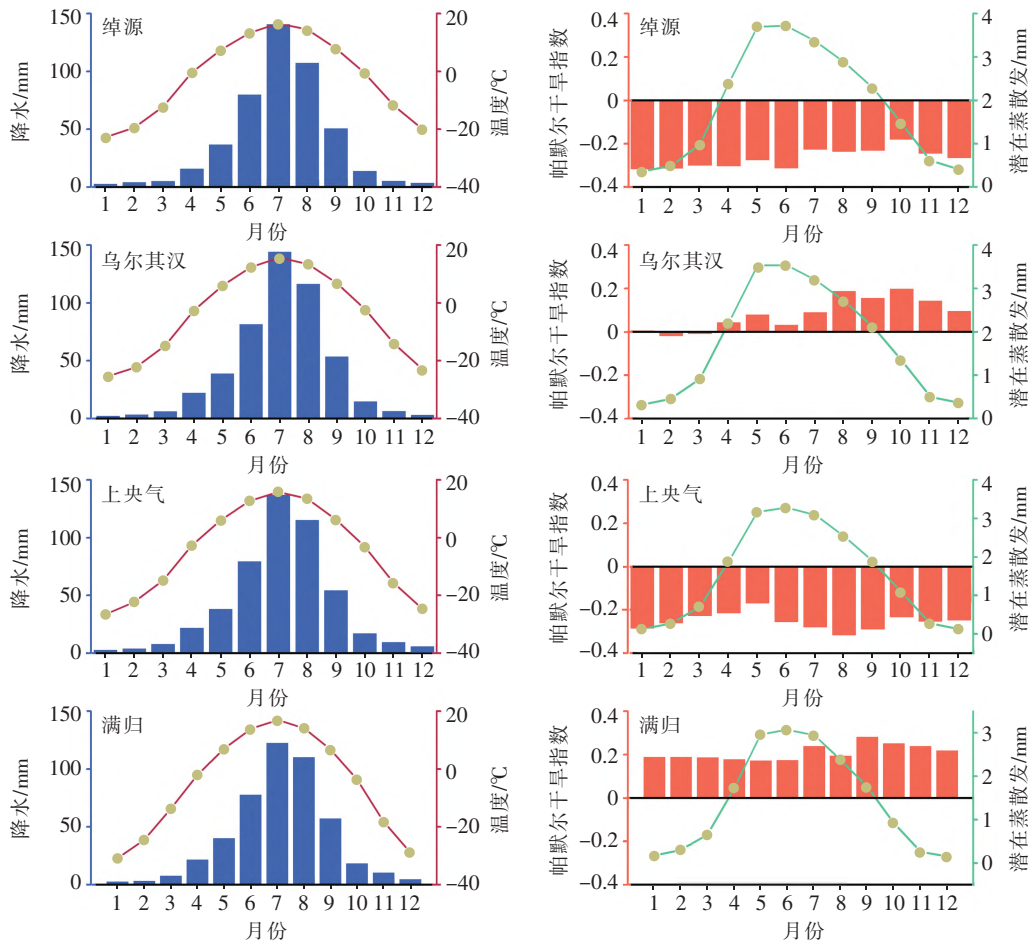


图 2 研究区逐月气候数据

Fig.2 Monthly climate data in research area

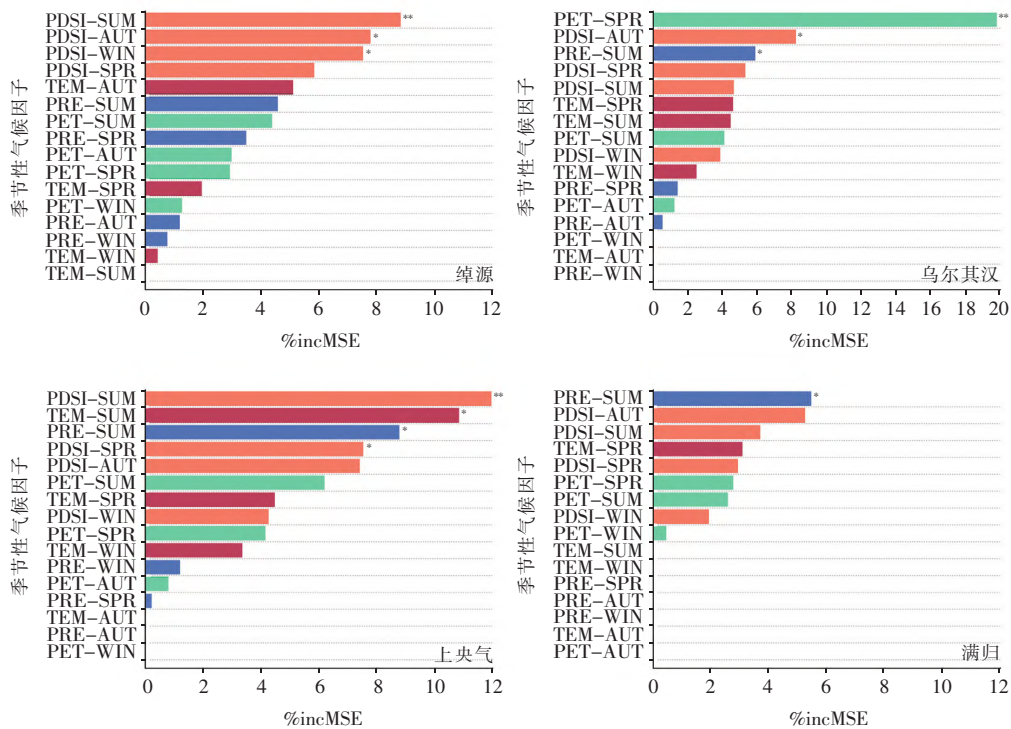
## 2 结果与分析

### 2.1 兴安落叶松主要调控因素在温度梯度上的差异

气候因子对兴安落叶松径向生长的重要性,在温度梯度上具有明显差异(图3,图4)。随机森林和回归分析结果显示夏季和秋季帕默尔干旱指数对淖源采样点兴安落叶松径向生长具有显著促进作用,冬季帕默尔干旱指数对径向生长的促进作用未达到显著水平。乌拉其汉采样点兴安落叶松主要受到春季潜在蒸散发促进作用;虽然秋季帕默尔干旱指数和夏季降水对径向生长的重要性达到显著水平,但回归分析显示两种气候因子对径向生长未呈现显著影响。在上央气采样点,兴安落叶松主要受到夏季帕默尔干旱指数、春季帕默尔干旱指数和夏季降水促进作用;受到夏季温度抑制作用。在满归采样点,夏季降水对兴安落叶松径向生长具有微弱的促进作用。

### 2.2 气候因子间交互作用对径向生长的影响

变差分解结果显示(图5):气候因子间交互作用对淖源和乌拉其汉采样点兴安落叶松径向生长的影响低于单独气候因子的影响,潜在蒸散发和帕默尔干旱指数具有最高的解释量,在淖源采样点中解释了径向生长变化的 11.7% 和 8.3%,在乌拉其汉采样点中为 19.5% 和 10.8%。帕默尔干旱指数和降水的交互作用解释了淖源采样点径向生长变化的 4.4%;潜在蒸散发和温度解释了乌拉其汉采样点径向生长 11.1% 的变化。在上央气采样点中,单个气候因子具有最高的解释量,帕默尔干旱指数解释了径向生长变化的 13.1%,其次为降水的影响和 4 种气候因子的交互作用,分别具有 6.9% 和 6.8% 的解释量;同时,温度解释了径向生长 4.2% 的变化。但是在满归采样点中,潜在蒸散发、帕默尔干旱指数和降水的三者交互作用具有最高的解释量,为 2.8%,其次为降水的单因子影响 1.3%。



注: \* 代表  $P < 0.05$  水平下显著; \*\* 代表  $P < 0.01$  水平下极显著。

图3 季节性气候因素对兴安落叶松径向生长的重要性

Fig.3 Importance of seasonal climatic factors to radial growth of *Larix gmelinii*

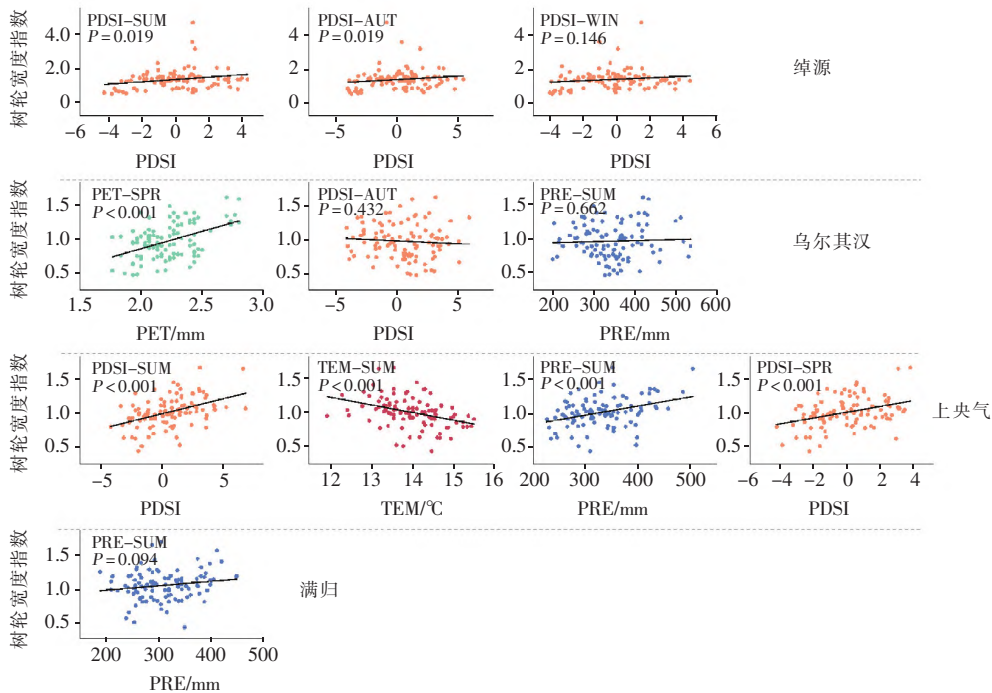


图4 主要气候因素与树轮宽度年表的回归分析

Fig.4 Regression analysis of main climatic factors and tree-ring width chronology

2.3 温度梯度下兴安落叶松主要影响因素的变化特征

在温度梯度下,兴安落叶松与主要影响因素的滑动相关结果显示有明显差异(图6)。在年平均温度相对较高的绰源和乌兰其汗采样点,兴安落叶松主要影响因素未出现明显变化趋势,仅春季潜在蒸散发对乌兰其汗采样点兴安落叶松的影响由显著正相关转

变为不显著相关。然而,在年平均温度相对较低的上央气和满归采样点中,兴安落叶松主要影响因素发生了明显转变。在上央气采样点中,夏季帕默尔干旱指数和夏季降水由不显著正相关转变为显著正相关;夏季温度由显著负相关转变为无相关性,再转变为显著负相关。满归采样点,夏季降水由不显著正相关转变

为显著正相关,最终转变为不显著正相关。4个采样点年平均温度均为上升趋势,尤其在1980年后,年平均温

度具有明显上升趋势。因此,在年平均温度相对较低的地点,气候变暖会导致水分对树木生长愈来愈重要。

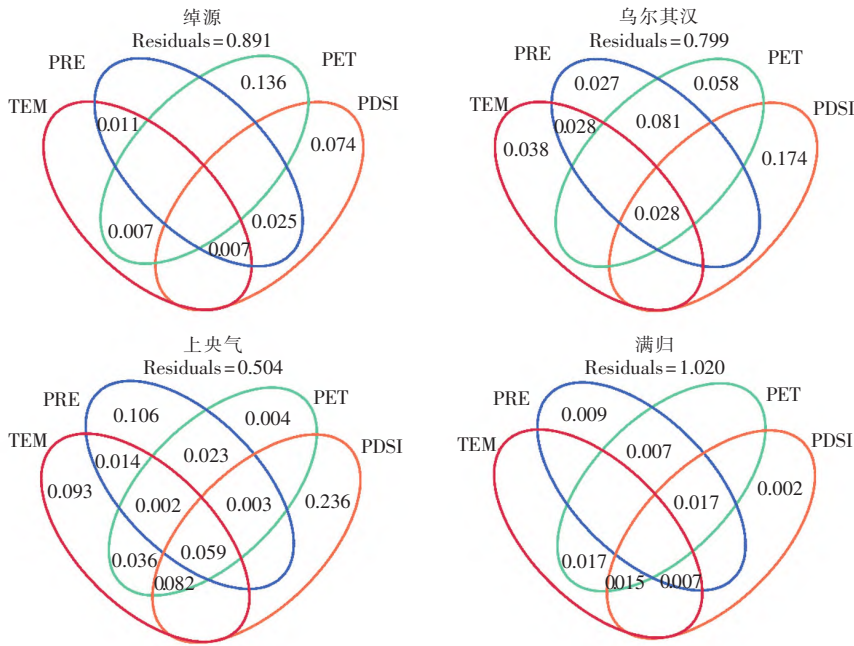


图5 气候因素对兴安落叶松径向生长的交互作用

Fig.5 Interaction effect of climate factors on radial growth of *Larix gmelinii*

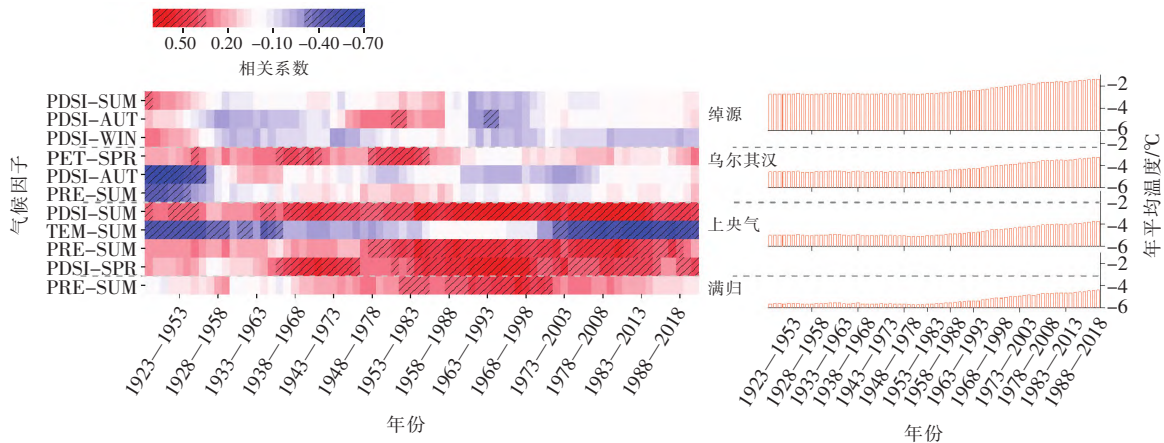


图6 兴安落叶松树轮宽度指数与主要气候因素的31 a窗口滑动相关分析

Fig.6 31-year window moving correlation analysis on tree-ring width index of *Larix gmelinii* and main climatic factors

### 3 讨论

#### 3.1 兴安落叶松径向生长调控因素在温度梯度上的差异

本研究基于随机森林模型和回归分析,探究温度梯度下兴安落叶松径向生长控制因素,结果与韩艳刚等<sup>[11]</sup>、Jiang 等<sup>[12]</sup>研究结果相似,兴安落叶松径向生长主要受到春、夏季可利用水分的促进作用。已有研究证明了月份组合或季节性气候因素对兴安落叶松径向生长调控作用较单个月份更强<sup>[9]</sup>。春季降水提高土壤含水量,促进细胞内营养物质运输和蛋白质合成,保证树木正常发育以及形成较宽的

年轮<sup>[22]</sup>。夏季是针叶树种日细胞生产量最高时期<sup>[23]</sup>,也是兴安落叶松合成碳水化合物并进行快速生长关键阶段<sup>[24]</sup>,充足水分条件促进树木的蒸腾和光合作用,进而加快细胞扩增并促进树木生长<sup>[11]</sup>。同时,树木在夏季快速生长的同时需消耗大量水分来满足代谢需要<sup>[25]</sup>,但夏季高温导致土壤含水量加剧蒸发,降低树木可利用水分,反而抑制树木生长。此外,在温暖区域,高温可能加速水分蒸发和树木蒸腾作用,降低土壤中可利用水分;而在寒冷区域,水分损失相对较少,充足水分条件保障了树木生长生理活动。这在一定程度上解释了可利用水分对年平均温度相对较高区域(绰源、乌拉其汉、上央气)的

树木生长具有更强促进作用。

虽然通过随机森林模型发现,夏季降水是满归采样点兴安落叶松径向生长主要调控因素,但是回归分析表明降水对该采样点树木生长未呈现显著影响。已有研究发现大兴安岭北部地区兴安落叶松径向生长主要受到生长季前温度的促进作用<sup>[9-11]</sup>;降水虽然对兴安落叶松径向生长影响较弱,但可利用水分是影响树木生长重要因素<sup>[8]</sup>。大兴安岭地区作为冻土分布区,保障了树木生长过程中充足的土壤可利用水分<sup>[9, 26]</sup>。但是,气候变暖加速了大兴安岭永久冻土消退,加剧了土壤水分渗透和蒸发,导致兴安落叶松未来更严重的干旱胁迫和生长衰退现象<sup>[27-28]</sup>。

越来越多研究表明,树木生长受到因素间交互作用驱动影响<sup>[25, 29-30]</sup>。本研究表明,气候因素间交互作用对兴安落叶松径向生长影响存在温度梯度的差异,年平均温度较高区域主要受到单个气候因子的影响,年平均温度较低区域主要受到交互作用影响。在中国北方,地表温度和相对湿度的交互作用抑制了油松(*Pinus tabulaeformis*)径向生长;而太阳入射量和相对湿度的交互作用促进了油松径向生长<sup>[25]</sup>。此外,现有研究多关注林分条件和树木自身特征的交互作用对生长气候关系影响。在欧洲的一项研究发现,个体树木间竞争与海拔相互作用显著影响了树木与温度和降水关系<sup>[30]</sup>。因此,在后续针对兴安落叶松径向生长影响因素研究中,也需要充分考虑气候因素与林分状况或树木自身特征之间交互作用对树木生长驱动作用。

### 3.2 气候变暖导致兴安落叶松调控因素的变化

气候变暖的趋势下,兴安落叶松主要调控因素也发生了变化<sup>[8-11]</sup>。本研究使用1919—2020年气候因子发现,研究区1980年左右开始迅速变暖,这与多项在中国北方研究结果一致<sup>[31]</sup>,树木生长对气候因子响应在温度梯度上具有不同的变化特征。大兴安岭兴安落叶松存在生长气候关系不稳定性<sup>[32]</sup>,本研究发现兴安落叶松这种气候关系不稳定性在年均温较低区域更强。已有研究证明了升温引起环境暖干化使土壤水分开始成为限制落叶松径向生长的因素<sup>[9]</sup>,本研究发现这种现象可能在年平均温度相对较低区域更严重。首先,温度升高促进了植物光合作用和蒸腾作用,加速了新细胞产生到成熟过程,并延长了树木生长时间,增加了树木水分消耗<sup>[33]</sup>。其次,升温导致土壤水分蒸发加剧,可能导致树木生长时期水分亏缺,造成干旱胁迫,抑制树木生长<sup>[34-35]</sup>。

夏季降水对满归采样点兴安落叶松径向生长的影响由不显著转变为显著正相关最终转变为不显

著,这可能与其所处冻土环境有关。当快速升温开始时,加快了地表水分蒸发,降低了土壤水分含量,使树木生长无法得到充足水分供应,故此时降水对树木生长影响显著。当温度持续升高后,加快了冻土融化,为兴安落叶松的生长提供了充足水分,降低了兴安落叶松对水分敏感性<sup>[9]</sup>。

此外,气候变暖改变了大兴安岭的区域环境,尤其自1980年快速升温以后,区域气候由半湿润逐渐向半干旱转变,这种暖干化气候趋势也将诱使大兴安岭生态系统萎缩和退化<sup>[36]</sup>。已有研究表明,持续升温可能会加速树木受到干旱胁迫,导致低、中纬度兴安落叶松生长衰退<sup>[37]</sup>,本研究发现,在年平均温度较低的高纬度地区树木生长可能面临更严重干旱胁迫。

## 4 结论

本研究以大兴安岭温度梯度下4个采样点的兴安落叶松为研究对象,基于树木年轮学研究方法,结合随机森林模型和回归分析的分析方法,结果发现:

(1)可利用水分是驱动树木径向生长主要因素,树木生长主要驱动因素在温度梯度下表现出明显差异。

(2)绰源和乌尔其汉采样点树木生长分别受到夏季帕默尔干旱指数和春季潜在蒸散发促进作用;上央气采样点树木径向生长受到夏季帕默尔干旱指数和降水、春季帕默尔干旱指数显著促进作用,受到夏季温度显著抑制作用。

(3)气候因素的交互作用对上央气和满归采样点的树木生长影响更强;绰源和乌尔其汉采样点树木生长主要受到单独气候因子的影响。

(4)随着气候变暖,绰源和乌尔其汉采样点树木生长的主要调控因素未呈现明显变化;上央气和满归采样点的帕默尔干旱指数和降水由不显著相关性转变为显著正相关,上央气采样点树木生长与夏季温度由不显著负相关转变为显著负相关。

本研究结果表明,在未来气候变暖背景下,年平均温度较低区域兴安落叶松可能面临更严重的水分胁迫问题。此外,为准确评估气候变化对大兴安岭森林生态系统影响,还需充分考虑树木生长过程多种控制因素之间交互作用。

### 参考文献:

- [1] PAN Y D, RICHARD A B, FANG J Y, et al. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [2] HUANG J G, MA Q Q, ROSSI S, et al. Photoperiod and temperature as dominant environmental drivers triggering secondary growth resumption in Northern Hemisphere conifers[J]. *Proceedings of*

- the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(34): 20645–20652.
- [3] RICHARDSON A D, KEENAN T F, MIGLIAVACCA M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 156–173.
- [4] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 农业应对气候变化蓝皮书: 气候变化对中国农业影响评估报告 No.1[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.
- [5] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392–401.
- [6] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. *生态学报*, 2013, 33(2): 519–531.
- [7] 徐化成. 中国大兴安岭森林[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 孙振静, 赵慧颖, 朱良军, 等. 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[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(6): 1–14.
- [9] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 等. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(3): 279–289.
- [10] 杨婧雯, 张秋良, 宋文琦, 等. 大兴安岭兴安落叶松和樟子松径向生长对气候变化的响应差异[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3415–3427.
- [11] 韩艳刚, 盖学瑞, 邱思玉, 等. 大兴安岭兴安落叶松径向生长对气候响应的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3397–3404.
- [12] JIANG Y G, ZHANG J H, HAN S J, et al. Radial Growth Response of *Larix gmelinii* to Climate along a Latitudinal Gradient in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China [J]. *Forests*, 2016, 7(12): 295.
- [13] FLURIN B, BOURIAUD O, BENJAMIN P, et al. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth [J]. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaat4313.
- [14] 李宗善, 刘国华, 傅伯杰, 等. 川西卧龙国家级自然保护区树木生长对气候响应的稳定性评估[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1045–1057.
- [15] 赵志江, 谭留夷, 康东伟, 等. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 603–609.
- [16] MARVIN A S, TERAH L S. An Introduction to Tree-Ring Dating [M]. Tucson: University of Arizona Press, 1996.
- [17] RICHARD L H. Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement[J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, 43(3): 51–67.
- [18] 石欣荣, 余敦先, 夏军, 等. 1960—2019年三北地区潜在蒸散发的变化及归因[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(10): 973–984.
- [19] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11: 1931–1946.
- [20] BREIMAN L. Random Forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5–32.
- [21] CUI Y X, BING H J, MOORHEAD D L, et al. Ecoenzymatic stoichiometry reveals widespread soil phosphorus limitation to microbial metabolism across Chinese forests [J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3: 184.
- [22] ZHANG Y X, SHAO X M, XU Y, et al. Process-based modeling analyses of *Sabina przewalskii* growth response to climate factors around the northeastern Qaidam Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(14): 1518–1525.
- [23] ANDREAS G, JOLANDA Z, GERHARD W, et al. Effects of climate variables on intra-annual stem radial increment in *Pinus cembra* (L.) along the alpine treeline ecotone [J]. *Annals of Forest Science*, 2009, 66(5): 503.
- [24] MEI L, XIONG Y M, GU J C, et al. Whole-tree dynamics of non-structural carbohydrate and nitrogen pools across different seasons and in response to girdling in two temperate trees [J]. *Oecologia*, 2015, 177(2): 333–344.
- [25] SONG W Q, ZHAO B Q, MU C C, et al. Moisture availability influences the formation and characteristics of earlywood of *Pinus tabulaeformis* more than latewood in northern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 327: 109219.
- [26] 孙广友, 于少鹏, 王海霞. 大小兴安岭多年冻土的主导成因及分布模式[J]. *地理科学*, 2007, 27(1): 68–74.
- [27] CHEN Z C, ZHANG Y D, LI Z S, et al. Climate change increased the intrinsic water use efficiency of *Larix gmelinii* in permafrost degradation areas, but did not promote its growth [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108957.
- [28] LU Q Q, LIU X H, ANHÄUSER T, et al. Tree-ring lignin proxies in *Larix gmelinii* forest growing in a permafrost area of northeastern China: Temporal variation and potential for climate reconstructions [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106750.
- [29] JIANG X Y, HUANG J G, STADT K J, et al. Spatial climate-dependent growth response of boreal mixedwood forest in western Canada [J]. *Global Planet Change*, 2016, 139: 141–150.
- [30] PRIMICIA I, CAMARERO J J, JANDA P, et al. Age, competition, disturbance and elevation effects on tree and stand growth response of primary *Picea abies* forest to climate [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 354: 77–86.
- [31] YASMEEN S, WANG X C, ZHAO H Y, et al. Contrasting climate-growth relationship between *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a latitudinal gradient in Daxing'an Mountains, China [J]. *Dendrochronologia*, 2019, 58: 125645.
- [32] ZHANG X W, LIU X H, ZHANG Q L, et al. Species-specific tree growth and intrinsic water-use efficiency of Dahurian larch (*Larix gmelinii*) and Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) growing in a boreal permafrost region of the Greater Hinggan Mountains, Northeastern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 145–155.
- [33] 尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿尔泰山南坡树轮宽度对气候变暖的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2246–2253.
- [34] BÜNTGEN U, FRANK D C, SCHMIDHALTER M, et al. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology [J]. *Trees*, 2006, 20(1): 99–110.
- [35] ZHU H F, FANG X Q, SHAO X M, et al. Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon [J]. *Climate of the Past*, 2009, 5(4): 661–666.
- [36] ZHU L J, COOPER D J, HAN S J, et al. Influence of the Atlantic multidecadal oscillation on drought in northern Daxing'an Mountains, Northeast China [J]. *Catena*, 2021, 198: 105017.
- [37] 李峰, 周广胜, 曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2255–2260.