

[编者按] 在全球变暖的背景下,区域气候如何影响树木生长,树木生长又以怎样的方式响应气候变化,如何客观评估现今气候在历史框架中的位置等问题,还有待于更多的研究来回答。

树木年轮学经过近百年的发展,在气候环境变化、生态学、考古等领域具有不可替代的作用。在我国,上世纪三四十年代已经有了零星的应用研究,然而自上世纪90年代以来这一学科才得到了快速发展,相继取得了一批重要的研究成果。中国树木年轮大会作为中国树轮人的一个重要的学术交流平台,每2年召开一次,旨在通过交流树轮研究领域的最新进展和成果,以推动树轮科学繁荣发展,服务国家战略需求。参会人数已从第一届(2008年)的80余人发展到第六届(2019年)的300多人。

在中国地理学会树木年轮研究工作组、北京师范大学、中国科学院地球环境研究所等国内多家单位的共同努力下,第七届中国树木年轮学大会将于2021年11月在珠海召开。为配合大会的召开,大会组委会在《应用生态学报》组织了这期专刊。专刊收集了41篇树轮相关研究论文,其中,树轮-气候/水文响应分析论文20篇,涉及到全国范围内不同树种(油松、落叶松、樟子松、黄杉、云杉、马尾松、杉木、蒙古栎、水曲柳等)、不同海拔树木径向生长或者密度变化对气候变化的响应分析;历史重建论文5篇,其中干湿变化历史重建论文3篇,归一化植被指数NDVI历史重建论文2篇;综述性论文8篇,分别为关于树轮年内稳定同位素、树木形成层活动及其影响因素、树轮汞记录、树轮木质素甲氧基稳定氢同位素比率测定方法、我国古树资源的生存现状评估及威胁因素分析、古树树龄估算和火山活动对气候变化的影响机制等研究进展;树木生长对气候变化和(或)虫灾的生态弹性论文2篇;其余的研究还涉及了古木树种鉴定及生态环境的研究潜力、树轮生长的VS模型模拟分等方面。

可以看出,气候变化对树木生长的影响以及树木生长对气候变化的响应分析及历史重建仍是目前树木年轮学研究的主要关注方向。希望本期文章的出版,能够使更多不同研究领域的学者关注、重视和投入到树木年轮学研究,加强多学科交流,进一步拓展中国树木年轮学的研究广度和深度。最后,感谢中国科学院沈阳应用生态研究所于大炮研究员和本期所有作者及审稿专家的贡献,有你们的热情付出才有本期树轮专刊的出版。

大兴安岭兴安落叶松径向生长 对气候响应的时空变化

韩艳刚^{1,2} 盖学瑞³ 邱思玉⁴ 张月^{1,2} 王守乐^{2,5} 周莉¹ 于大炮^{1*}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所,中国科学院森林生态与管理重点实验室,沈阳110016; ²中国科学院大学,北京100049; ³沈阳师范大学旅游管理学院,沈阳110034; ⁴北京林业大学森林资源和环境管理国家林业局重点开放性实验室,北京100083; ⁵中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐830011)

摘要 根据兴安落叶松在大兴安岭山脉的分布特征,沿纬度设置了9个采样点,分析了兴安落叶松径向生长对气候因子响应的空间差异和时间动态。结果表明:总体上所有采样点的兴安落叶松径向生长与夏季(6—8月)标准化降水蒸散指数(SPEI)及降水量、2月SPEI及降水量呈正相关,与3月温度呈负相关。在空间上,南部年均温较高区域的兴安落叶松径向生长与2月SPEI呈显著正相关,在北部年均温较低的区域与3月温度呈显著负相关。在时间上,兴安落叶松生长-气候关系不稳定。随着温度升高,在年均温较高区域,夏季SPEI和降水量对树木生长的正效应以及夏季温度的负响应显著增强;在年均温较低区域,树木生长与3

本文由国家自然科学基金项目(31770665, 41871105)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31770665, 41871105).

2021-03-22 Received, 2021-07-14 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yudp2003@iae.ac.cn

月温度负响应增强更明显。这表明气候变化改变了树木生长-气候关系,而且存在明显空间差异。在未来气候暖干化的背景下,大兴安岭兴安落叶松径向生长会受到抑制,在年均温较高且降水量较少的南部地区会因夏季水分亏缺和冬季干旱而衰退,温度较低的北部地区则可能因冬季干旱和冬季变暖而使生长受到抑制。

关键词 树木年轮; 生长-气候关系; 时空差异; 兴安落叶松

Spatial and temporal variations of the responses of radial growth of *Larix gmelinii* to climate in the Daxing'anling Mountains of Northeast China. HAN Yan-gang^{1,2}, GAI Xue-tui³, QIU Si-yu⁴, ZHANG Yue^{1,2}, WANG Shou-le^{2,5}, ZHOU Li¹, YU Da-pao^{1*} (¹Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³School of Tourism and Hospitality Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; ⁴State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ⁵Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China).

Abstract: Following the distribution characteristics of *Larix gmelinii* in Daxing'anling Mountains, nine sampling sites along a latitude gradient were set up to analyze the spatial difference and temporal dynamic in the responses of radial growth of *L. gmelinii* to climate. Overall, the radial growth of *L. gmelinii* was positively correlated with the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in summer (June to August), summer precipitation, February SPEI, and February precipitation, but was negatively correlated with the March temperature. Spatially, in the southern area of the region with higher annual average temperature, the radial growth of *L. gmelinii* had a significant positive correlation with February SPEI. In the northern area with lower annual average temperature, the radial growth of *L. gmelinii* was negatively correlated with the temperature in March. Temporally, the growth-climate relationship for *L. gmelinii* was unstable. In the area with higher annual average temperature, the positive effects of SPEI and precipitation, as well as the negative effects of temperature in summer on growth significantly enhanced with climate warming. In the area with lower annual average temperature, the negative response of growth to March temperature enhanced more obviously. Such a result indicated that climate change would alter growth-climate relationship, with great spatial variations. Our results suggested that radial growth of *L. gmelinii* would be limited in the future climate of warm and dry in the Daxing'anling Mountains. The growth of *L. gmelinii* might obviously decline in south due to summer water deficit and winter drought, and might be inhibited in north because of warm and dry winter.

Key words: tree ring; growth-climate relationship; spatiotemporal variation; *Larix gmelinii*.

气候因素导致森林结构和森林生产力的变化存在区域差异,其主要机制是树木生长对气候因子的响应存在空间异质性^[1]。一般来说,北半球温带森林中,低纬度和低海拔树木生长主要受水分限制,而高纬度和高海拔树木生长主要受低温限制;另一方面,对于同一个树种来说,在其分布区的南端或下限,多受水分和高温的限制,而在其分布的上限,多受低温的限制^[2]。因此,气候变暖容易引起分布区南端及下限的树木遭受水分亏缺,导致生长变慢甚至死亡^[3];而分布区北端及上限的树木生长则可能在气候变暖中受益^[4],从而导致树木分布区的北移或上迁。因而,明确树木生长-气候关系的空间差异有助于理解气候变化对区域森林发展态势的影响。

然而,近年来大量研究证实,在气候变暖过程中,北半球高纬度、高海拔地区原本受益于温度升高的树木,其径向生长反而下降,一些树木生长原本受低温限制的地区,反而转变为水分限制,对气候响应的敏感性也明显减弱,即所谓的“气候分异”问题。如对北方森林和温带森林树木生长的研究发现,在1960—1990年对温度响应敏感的森林分布面积较1930—1960年显著降低,且树木生长逐渐向水分限制转化^[4]。这个发现打破了以往人们对树木生长-气候存在稳定的线性关系的认识,使得预测气候变暖背景下树木生长的空间差异存在诸多不确定性。

大兴安岭位于我国东北地区北端的寒温带气候区,是中国近几十年暖干化最严重的区域之一^[5]。

该区的地带性植被类型为兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 林, 树种组成单一, 树木生长对气候反应敏感, 因而该区域气候变暖如何影响森林动态受到了广泛的关注。目前, 落叶松生长-气候关系在纬度、海拔和降水梯度上的差异已有大量研究^[6-9], 但由于研究目的差异导致在采样点选择、样本挑选方法等方面有所不同, 因而研究结果也不同。如有研究发现, 冬季温度对兴安落叶松径向生长具有抑制作用, 降水具有促进作用^[10], 生长季温度对兴安落叶松径向生长具有一定的负效应。但是也有研究发现, 该区兴安落叶松径向生长对夏季温度的正响应在持续增强^[11], 而且土壤温度升高促进了落叶松生长^[12]。不同研究结果间较差的可比性导致很难准确理解未来气候变化背景下该区兴安落叶松生长的时空差异及森林结构的变化趋势。

本研究采用树木年轮学方法研究了兴安落叶松生长与气候的关系, 分析气候变化对兴安落叶松生长的影响, 兴安落叶松生长对气候因子响应的空间差异, 揭示兴安落叶松生长-气候关系稳定性及生长限制性气候因子转变的空间差异, 以期预测我国寒温带地区树木生长和森林群落的发展趋势提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为大兴安岭 (47°19'48"—53°27'00" N, 120°00'36"—126°37'12" E), 位于中国东北北部(图1), 属于典型寒温带大陆性季风气候, 夏季温暖多雨, 冬季寒冷干燥。年降水量为 400~500 mm, 其中 60%~80% 发生在 6—8 月; 年均温 -5.5~-0.1 °C (表 1), 最冷月和最热月分别为 1 月和 7 月(图 2)。研究区地带性植被类型为兴安落叶松林, 主要树种为

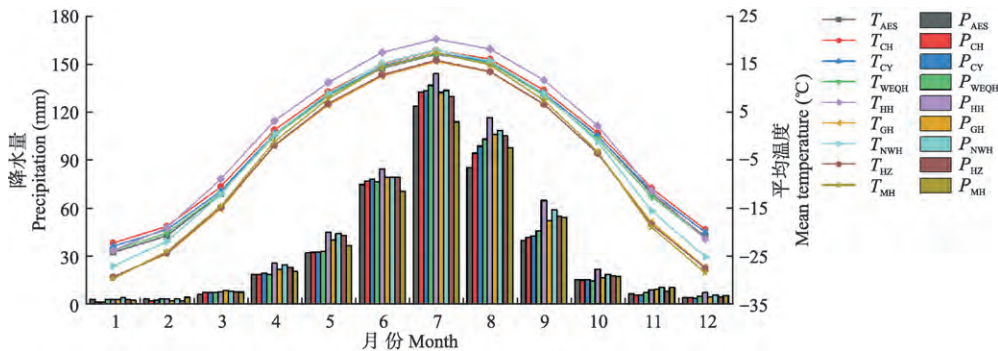


图 2 研究区月平均温度与降水量

Fig.2 Monthly mean temperature and total precipitation in the study area.

T: 温度 Temperature; P: 降水量 Precipitation.

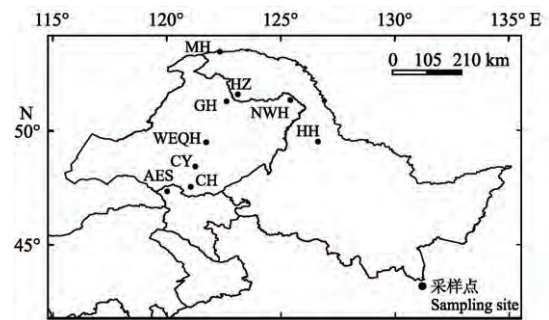


图 1 采样点位置

Fig.1 Location of the sampling sites.

AES: 阿尔山 Aershan; CH: 柴河 Chaihe; CY: 绰源 Chuoyuan; WEQH: 乌尔其汗 Wuerqihan; HH: 黑河 Heihe; GH: 根河 Genhe; NWH: 南翁河 Nanwenghe; HZ: 呼中 Huzhong; MH: 漠河 Mohe. 下同 The same below.

兴安落叶松, 还有少量的白桦 (*Betula platyphylla*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 和鱼鳞云杉 (*Picea jezoensis* var. *microsperma*) 等。土壤主要为酸性或次酸性淋溶土, 土层表面是矿物质与风沙土组成的薄层。

根据大兴安岭山脉走向和兴安落叶松分布特点, 本研究沿纬度梯度选择了 9 个样点(图 1)。最南端和最西端在阿尔山, 最北端在漠河, 最东端在黑河, 纬度相差 6.1°。采样点间年均温相差 5.4 °C, 年降水量相差 120 mm, 其中根河年均温最低, 阿尔山年降水量最小, 黑河年均温和年降水量均最大(表 1)。

1.2 样本采集与年表建立

在每个样点, 选择无人干扰或人为干扰较少, 且没有发生过明显火灾的保护区, 尽量在平坡或缓坡挑选 25~30 棵健康成熟的兴安落叶松, 每棵树采集 2 个树芯。带回实验室后固定、打磨和定年, 然后在 LINTAB 6 系统上进行测量 (0.01 mm), 并用 COFEHCA 程序检验定年和测量结果。剔除掉无法准确交叉定年的样芯后, 共保留 226 棵树木、371 个

表 1 采样点地理位置信息

Table 1 Geographic information of sampling sites

采样点 Sampling site	位置 Location	MAT ($^{\circ}\text{C}$)	MAP (mm)	12月 SPEI ₁₂ SPEI ₁₂ of December
阿尔山 Aershan	47°19'48" N, 120°00'36" E	-2.2	409.6	0.1063
柴河 Chaihe	47°31'48" N, 121°03'00" E	-1.1	429.0	0.1351
绰源 Chuoyuan	48°25'48" N, 121°15'00" E	-1.7	437.3	0.1394
乌尔其汗 Wuerqihan	49°28'12" N, 121°43'48" E	-2.3	450.3	0.1465
黑河 Heihe	49°30'00" N, 126°37'12" E	-0.1	530.0	0.1531
根河 Genhe	51°16'12" N, 122°37'12" E	-5.5	473.1	0.1428
南翁河 Nanwenghe	51°19'48" N, 125°25'12" E	-3.1	496.6	0.2158
呼中 Huzhong	51°34'48" N, 123°07'12" E	-5.4	475.1	0.1586
漠河 Mohe	53°27'00" N, 122°19'48" E	-4.9	439.0	0.1177

MAT: 年均温 Mean annual temperature; MAP: 年均降水量 Mean annual precipitation. 下同 The same below.

树芯测量数据用于建立年表。

使用弗莱德曼 (Friedman) 函数拟合年轮宽度序列以去除序列中的环境和年龄因素^[13]。轮宽的测量值除以函数拟合值后获得年轮指数。采用一阶自相关模型和双权重平均法合成差值年表。年表的建立过程在 R 软件 dplR 程序包中完成。

1.3 气候数据

本研究气候数据来自于 KNMI Climate Explorer 的 CRUTS 4.03 数据库 (<https://climexp.knmi.nl>)。对应每个采样点地理位置, 所下载气候数据的空间精度为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 时间跨度为 1956—2015 年。根据树木生长的物候节律以及大兴安岭南北气候的差异, 选择上年 9 月到当年 10 月的降水量、月平均温

度以及标准化降水蒸散指数 (SPEI), 用于生长-气候关系的分析。同时, 以 12 个月时间尺度 SPEI (SPEI₁₂) 表示年尺度 SPEI, 用 12 月 SPEI₁₂ 表示年度水分情况。利用线性回归分析气候变化趋势, 发现研究区 1980 年后升温加速, 研究区年均温在 1980—2015 年显著升高, 年降水量和 12 月 SPEI₁₂ 呈减少趋势 (表 2)。

1.4 树木径向生长-气候关系

采用相关函数法分析月气候因子与兴安落叶松年轮宽度年表之间的关系。为分析树木生长-气候关系随气候变化的稳定性, 根据相关分析结果, 选择对兴安落叶松生长有显著影响的气候因子, 通过步长为 21 年的滑动相关分析主要气候因子与树木生长关系的动态, 分析时将 6—8 月作为夏季。年表与气候因子相关性在 R 软件 treeclim 程序包中进行。

2 结果与分析

2.1 年轮年表特征

由表 3 可知, 兴安落叶松径向生长情况和年轮宽度年表中包含的气候信息存在较大的空间差异。各采样点年表可靠时段 (SSS > 0.85) 的长度范围为 60~196 年。采样点间树轮年度宽窄变化及包含的气候信息差异较大, 各年表标准差 (SD) 和平均敏感度 (MS) 范围分别是 0.152~0.230 和 0.17~0.29。年表信噪比 (SNR) 变化范围为 15.09~34.15, 序列间平均相关系数 (Rbar) 及第一主成分方差解释量 (VF) 变化范围为 0.337~0.528 和 37.4%~59.2%。所有年表样本总体代表量 (EPS) 均高于 0.85, 代表性较强。

2.2 径向生长-气候关系

由图 3 可以看出, 降水量和 SPEI 对树木生长具

表 2 采样点气候变化

Table 2 Climate dynamic of sampling sites

采样点 Sampling site	MAT 变化		MAP 变化		12月 SPEI ₁₂ 变化	
	Trend of MAT ($^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$)		Trend of MAP ($\text{mm}\cdot \text{a}^{-1}$)		Trend of SPEI ₁₂ of December (a^{-1})	
	1956—1979	1980—2015	1956—1979	1980—2015	1956—1979	1980—2015
阿尔山 Aershan	0.21	0.27*	-2.94	-1.18	-0.402	-0.217
柴河 Chaihe	0.20	0.27*	-3.20	-1.51	-0.412*	-0.295
绰源 Chuoyuan	0.21	0.25*	-2.88*	-1.81	-0.390*	-0.308
乌尔其汗 Wuerqihan	0.14	0.22*	-2.81*	-2.23	-0.312	-0.378*
黑河 Heihe	0.16	0.24*	-4.07	-0.69	-0.365	-0.102
根河 Genhe	0.07	0.20	-3.54*	-2.05	-0.465	-0.233
南翁河 Nanwenghe	0.14	0.22*	-3.83*	-0.74	-0.585*	-0.412*
呼中 Huzhong	0.11	0.19*	-3.77*	-1.79	-0.510	-0.228
漠河 Mohe	0.09	0.15	-3.83*	-0.84	-0.477	-0.070

* 线性回归趋势显著 Significance of linear regression at 0.05 level.

表 3 采样点年表统计特征

Table 3 Statistics for each site chronology

采样点 Sampling site	树芯/树木 Cores/ trees	SSS>0.85 年份 Year of SSS >0.85	差值年表特征值 Residual chronology statistics				公共区间分析 (1956—2015) Common interval analysis (1956—2015)			
			Mean	SD	MS	AC	SNR	EPS	Rbar	VF (%)
阿尔山 Aershan	40/24	1827—2016	0.973	0.215	0.25	-0.005	28.53	0.966	0.493	56.9
柴河 Chaihe	40/24	1877—2016	0.987	0.230	0.29	-0.049	34.15	0.972	0.528	54.3
绰源 Chuoyuan	40/24	1942—2016	0.995	0.152	0.17	0.002	17.82	0.947	0.380	47.3
乌尔其汗 Wuerqihan	40/25	1883—2016	1.000	0.177	0.19	-0.010	21.37	0.955	0.411	45.0
黑河 Heihe	40/25	1908—2015	0.991	0.157	0.19	-0.109	15.09	0.938	0.337	37.4
根河 Genhe	40/25	1873—2015	0.983	0.174	0.18	-0.024	18.01	0.947	0.383	44.6
南翁河 Nanwenghe	41/25	1956—2015	0.999	0.200	0.21	0.031	19.96	0.952	0.399	51.8
呼中 Huzhong	50/29	1820—2015	0.987	0.209	0.25	0.017	33.35	0.971	0.476	59.2
漠河 Mohe	40/25	1910—2015	1.001	0.173	0.19	0.009	26.34	0.963	0.470	47.1

SSS: 子样本信号强度 Subsample signal strength; Mean: 平均指数 Mean index; SD: 标准差 Standard deviation; MS: 平均敏感度 Mean sensitivity; AC: 一阶自相关 First-order autocorrelation; SNR: 信噪比 Signal-to-noise ratio; EPS: 样本总体代表量 Expressed population signal; Rbar: 平均相关系数 Mean inter-series correlation; VF: 第一主成分方差解释量 Variance in first eigenvector.

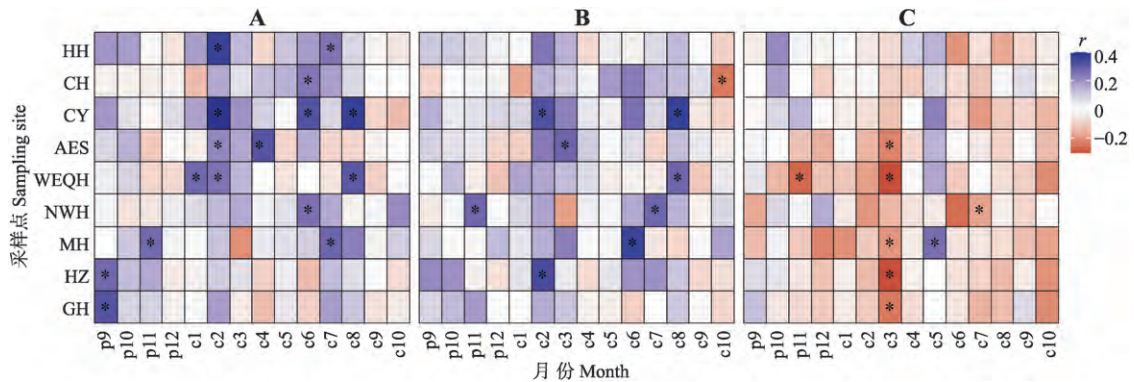


图 3 温度梯度上各样点年表气候因子相关性

Fig.3 Correlation between each residual site chronology and climate factors along temperature gradient.

* $P < 0.05$. r : 相关系数 Correlation coefficient. 下同 The same below. A: SPEI 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; B: 降水 Precipitation; C: 温度 Temperature. p: 上一年 Previous year; c: 当年 Current year.

有促进作用,且在温度较高的地区兴安落叶松年轮宽度年表与 SPEI 的正相关性更加明显。兴安落叶松径向生长主要与 2、6—8 月 SPEI 呈显著正相关; 温度与树木生长呈负相关,其中 3 月温度对 5 个样点兴安落叶松径向生长的抑制作用显著。

所有样点兴安落叶松径向生长与 2 月 SPEI 和降水量均呈正相关,在温度梯度上,乌尔其汗、阿尔山、绰源和黑河兴安落叶松径向生长与 2 月 SPEI 呈显著正相关,柴河、绰源、乌尔其汗、黑河、南翁河、漠河兴安落叶松径向生长还与 6—8 月中一个或多个月份 SPEI 呈显著正相关。除柴河外,其余样点年轮宽度年表与 SPEI 的正相关都有与降水量正相关关系重合的月份。温度的作用比较单一,不同样点兴安落叶松径向生长都与 3 月和 6—8 月温度呈负相关,而且年均温较低的地区兴安落叶松径向生长与温度的负相关关系较强。

2.3 径向生长-气候关系的稳定性

不同地区兴安落叶松径向生长对气候的响应均不稳定,但总体上其生长受水分的正效应和温度的负效应在增强(图 4)。树木生长对夏季(6—8 月)平均 SPEI 和降水量的响应在温度较高的绰源和柴河地区从 1980 年左右开始持续增强,而其他地区树木径向生长对夏季 SPEI 和降水量的正响应从 1989—2009 年开始便持续增强,有些采样点由负相关转为正相关。夏季温度对兴安落叶松径向生长在研究阶段的后期普遍存在抑制作用,多个地区则是径向生长与夏季温度相关性由正相关转为负相关,而且年均温较高的地区强于年均温较低的地区。兴安落叶松径向生长对 2 月 SPEI 的正响应在持续增强,其中多个样点在 1980—2000 年后达到显著水平。兴安落叶松径向生长对 3 月温度的负响应在年均温较低的根河、呼中、南翁河和阿尔山持续增强并

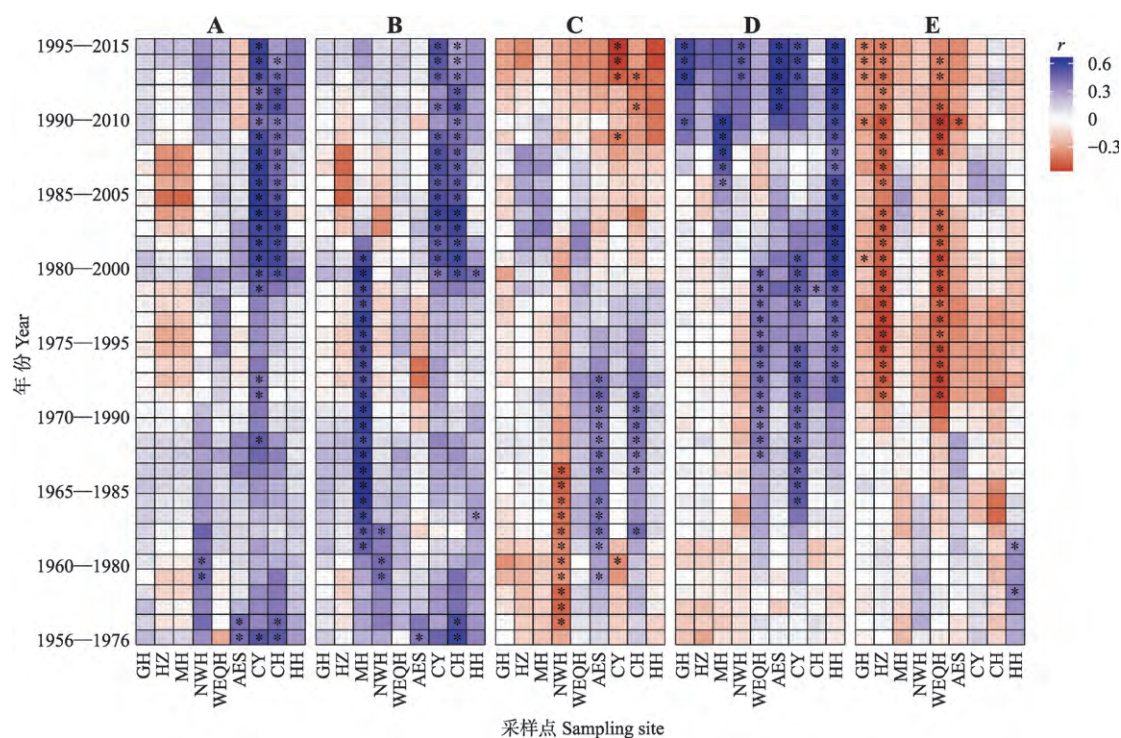


图4 温度梯度上各年表与气候因子滑动相关

Fig.4 Moving correlations between each site chronology and climate factors along temperature gradient.

A: 夏季月均 SPEI Monthly mean SPEI in summer; B: 夏季降水量 Precipitation in summer; C: 夏季月均温 Monthly mean temperature in summer; D: 2月 SPEI SPEI in February; E: 3月温度 Temperature in March.

达到了显著水平,其他地区径向生长对3月温度的负响应也呈增强趋势。

3 讨论

3.1 兴安落叶松径向生长-气候关系的空间差异

兴安落叶松径向生长对气候因子响应敏感,这与相近地区的研究结果相似^[7-8]。兴安落叶松年轮宽度年表中包含了丰富的气候信息,各年表平均敏感度和标准差高于相近地区的兴安落叶松树木年轮宽度年表^[7-8]。各采样点年表平均敏感度和标准差差异较大,这解释了不同样点间树木径向生长对气候因子的响应差异^[14]。

除了年均温较低的根河与呼中外,其他地区兴安落叶松径向生长与夏季一个月或多个SPEI呈显著正相关,表明夏季SPEI是研究区兴安落叶松生长的主要气候因子。这与Jiang等^[6]的研究结果一致。主要原因是研究区降水量较少且集中在夏季(64%~71%),此阶段是落叶松合成碳水化合物和生长的关键阶段^[15],良好的水分条件可以促进细胞扩增和光合作用,加快树木生长。

生长季开始前水分条件(SPEI)对兴安落叶松径向生长的影响存在明显的空间差异。乌尔其汗、阿尔山、绰源和黑河兴安落叶松径向生长与2月

SPEI呈显著正相关。这是因为这些样点年降水量较少(409.6~450.3 mm)且温度较高,冬季积雪可为树木早期生长补给水分^[16]。温度较低的根河和呼中地区树木生长与上年9月SPEI呈显著正相关,兴安落叶松在9月处于生长季末期,树木光合作用仍在继续,这个季节兴安落叶松树干和根部能够积累非结构性碳(NSC)用于越冬消耗,并为下一年生长季早期树木生长提供营养物质^[15,17],因此有利于树木形成宽轮。

以往研究认为,夏季^[11]、冬季(11月—次年3月)和春季(4—5月)温度升高^[7]具有加快落叶松生长的作用。本研究却发现,夏季温度对落叶松生长以负效应为主。一方面是因为本研究所选采样点与之不完全相同,另一方面,径向生长-气候关系受采样点及森林群落结构等多重原因的影响^[18-19]。同一区域内,树木生长对气候的响应会因采样点间微小差异而不同。这在一定程度上解释了本研究与上述研究结果之间的差异。同时表明了兴安落叶松径向生长与气候关系的复杂空间差异。因此,需要更为广阔且密集的采样点布设以完善相关研究。

所有年表均与3月温度呈负相关,其中温度较低的5个地区兴安落叶松径向生长与3月温度呈显著负相关。这与以往研究认为海拔或纬度分布上限

的兴安落叶松径向生长受低温限制的结果相反^[20], 表明低温并非本研究区兴安落叶松径向生长的限制因子。兴安落叶松在 3 月处于休眠期^[21], 土壤水分以固态形式存在, 该阶段较早升温将导致积雪与冻土提前融化, 容易形成对树木根系不利的土壤水分和气体条件^[22]。同时, 3 月升温导致树木呼吸作用提前开始, 加速消耗营养物质, 从而不利于树木生长^[23]。

3.2 径向生长-气候关系的稳定性

气候暖干化趋势下, 树木生长的限制性气候因子也发生了改变^[4]。研究区 1980 年左右开始迅速变暖^[5, 7], 不同地区树木生长对气候因子的响应发生了不同程度的变化。生长-气候关系不稳定性在关于大兴安岭兴安落叶松和其他树种的研究中均有报道^[8, 24]。本研究中, 年均温较高的柴河与绰源地区兴安落叶松生长与夏季 SPEI 和降水量在 1980 年左右达到显著正相关, 而与夏季温度在 1990 年左右开始达到显著负相关。其他地区兴安落叶松径向生长与夏季 SPEI、降水量和温度虽未达到显著相关, 但是兴安落叶松径向生长与该季节 SPEI 和降水量的正相关性以及与温度的负相关性均在持续增强。主要原因一方面是降水减少的直接作用, 另一方面是升温导致树木水分消耗增加及环境蒸散加快而导致水分亏缺^[23]。综上, 该区域兴安落叶松生长受夏季水分亏缺的不利影响持续增强。

冬季变暖对耐寒树木的生长威胁严重^[25], 兴安落叶松每年处于冬季的时间长达 5 个月^[8]。冬季变暖会造成冬季干旱^[26], 冬季干旱对高纬度和高海拔树木健康状态的不利影响强于寒冷^[27]。此外, 冬季积雪和冻土融化是大兴安岭树木生长季前期水分的主要来源^[19]。9 个地区树木径向生长与 2 月 SPEI 呈正相关, 与 3 月温度呈负相关。各采样点树木径向生长与 2 月 SPEI 和 3 月温度的相关性在研究阶段后期持续增强。这些结果反映了兴安落叶松生长对冬季水分条件响应敏感。另一方面冬季变暖会影响树木生理活动^[26], 落叶树种春季需消耗体内储存的 NSC 生长新枝叶, 冬季变暖导致冻融循环增加, 树木消耗储存的 NSC 用于抵抗冬季胁迫, 因而不利于来年生长。冬季干旱和升温导致的养分消耗增加会降低树木抗冻能力^[20, 27]。冬季变暖对树木径向生长的不利影响是温度较低地区兴安落叶松径向生长受 3 月温度负效应较强的原因。由此可见, 大兴安岭地区兴安落叶松生长不会受益于气候暖干化。相反, 气候暖干化导致的夏季水分亏缺会使温度较高且降水

较少的南部地区树木径向生长衰退, 冬季干旱会限制整个研究区兴安落叶松径向生长, 而 3 月升温则会抑制低温寒冷地区兴安落叶松径向生长。

参考文献

- [1] Yu D, Liu J, Benard J L, et al. Spatial variation and temporal instability in the climate-growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of North-east China. *Forest Ecology and Management*, 2013, **300**: 96-105
- [2] 盖学瑞, 于大炮, 王守乐, 等. 树轮-气候“分异问题”形成机制的研究进展. *生态学杂志*, 2017, **36** (11): 3273-3280 [Gai X-R, Yu D-P, Wang S-L, et al. A review of formation mechanism on the divergence problem of tree growth-climate relationship. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(11): 3273-3280]
- [3] Cailleret M, Jansen S, Robert EM, et al. A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 2017, **23**: 1675-1690
- [4] Babst F, Bouriaud O, Poulter B, et al. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 2019, **5**: 1-9
- [5] 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. *生态学报*, 2013, **33** (2): 519-531 [He W, Bu R-C, Xiong Z-P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33** (2): 519-531]
- [6] Jiang Y, Zhang J, Han S, et al. Radial growth response of *Larix gmelinii* to climate along a latitudinal gradient in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China. *Forests*, 2016, **7**: 1-12
- [7] Yasmeen S, Wang X, Zhao H, et al. Contrasting climate-growth relationship between *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* along a latitudinal gradient in Daxing'an Mountains, China. *Dendrochronologia*, 2019, **58**: 1-12
- [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. *北京林业大学学报*, 2019, **41** (6): 1-14 [Sun Z-J, Zhao H-Y, Zhu L-J, et al. Differences in response of *Larix gmelinii* growth to rising temperature under different precipitation gradients in northern Daxing'an Mountains of northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, **41** (6): 1-14]
- [9] 白学平, 常永兴, 张先亮, 等. 近 30 年快速升温对两种典型小地形上兴安落叶松径向生长的影响. *应用生态学报*, 2016, **27** (12): 3853-3861 [Bai X-P, Chang Y-X, Zhang X-L, et al. Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical micro-topographies in the recent 30 years. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27** (12): 3853-3861]

- [10] 张先亮, 崔明星, 马艳军, 等. 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 [Zhang X-L, Cui M-X, Ma Y-J, et al. *Larix gmelinii* tree-ring width chronology and its responses to climate change in Kuduer, Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(10): 2501–2507]
- [11] Zhang X, Bai X, Chang Y, et al. Increased sensitivity of Dahurian larch radial growth to summer temperature with the rapid warming in Northeast China. *Trees*, 2016, **30**: 1799–1806
- [12] Zhang X, Bai X, Hou M, et al. Warmer winter ground temperatures trigger rapid growth of Dahurian larch in the permafrost forests of Northeast China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, **124**: 1088–1097
- [13] Schurman JS, Babst F, Bjorklund J, et al. The climatic drivers of primary *Picea* forest growth along the Carpathian arc are changing under rising temperatures. *Global Change Biology*, 2019, **25**: 3136–3150
- [14] 于健, 陈佳佳, 孟盛旺, 等. 长白山群落交错带长白松和鱼鳞云杉径向生长对气候变暖的响应. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 46–56 [Yu J, Chen J-J, Meng S-W, et al. Response of radial growth of *Pinus sylvestris-formis* and *Picea jezoensis* to climate warming in the ecotone of Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(1): 46–56]
- [15] Mei L, Xiong Y, Gu J, et al. Whole-tree dynamics of non-structural carbohydrate and nitrogen pools across different seasons and in response to girdling in two temperate trees. *Oecologia*, 2015, **177**: 333–344
- [16] Zhang X, Manzanedo RD, D'Orangeville L, et al. Snowmelt and early to mid-growing season water availability augment tree growth during rapid warming in southern Asian boreal forests. *Global Change Biology*, 2019, **25**: 3462–3471
- [17] Tixier A, Gambetta GA, Godfrey J, et al. Non-structural carbohydrates in dormant woody perennials: The tale of winter survival and spring arrival. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2019, **2**: 1–8
- [18] 韩艳刚, 周旺明, 齐麟, 等. 长白山树木径向生长对气候因子的响应. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1513–1520 [Han Y-G, Zhou W-M, Qi L, et al. Tree radial growth-climate relationship in Changbai Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1513–1520]
- [19] Li W, Jiang Y, Dong M, et al. Species-specific growth-climate responses of Dahurian larch (*Larix gmelinii*) and Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in the Greater Khingan Range, northeast China. *Dendrochronologia*, 2021, **65**: 1–10
- [20] Bai X, Zhang X, Li J, et al. Altitudinal disparity in growth of Dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.) in response to recent climate change in northeast China. *Science of the Total Environment*, 2019, **670**: 466–477
- [21] Fu Y, He H, Zhao J, et al. Climate and spring phenology effects on autumn phenology in the Greater Khingan Mountains, Northeastern China. *Remote Sensing*, 2018, **10**: 1–22
- [22] Bryukhanova MV, Fonti P, Kirdeyanov AV, et al. The response of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and cell anatomy of *Larix gmelinii* tree rings to differing soil active layer depths. *Dendrochronologia*, 2015, **34**: 51–59
- [23] Zhang X, Liu X, Zhang Q, 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **248**: 145–155
- [24] 吕朝阳, 贡瑞鑫, 吴涛, 等. 寒温带森林白桦径向生长的海拔差异及其气候响应——以奥克里堆山为例. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 1889–1897 [Lyu C-Y, Yun R-X, Wu T, et al. Altitudinal differentiation in the radial growth of *Betula platyphylla* and its response to climate in cold temperate forest: A case of Oakley Mountain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 1889–1897]
- [25] Williams CM, Henry HA, Sinclair BJ. Cold truths: How winter drives responses of terrestrial organisms to climate change. *Biological Reviews*, 2015, **90**: 214–235
- [26] Domisch T, Martz F, Repo T, et al. Winter survival of Scots pine seedlings under different snow conditions. *Tree Physiology*, 2017, **38**: 602–616
- [27] Charrier G, Ngao J, Saudreau M, et al. Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology, and frost resistance in trees. *Frontiers in Plant Science*, 2015, **6**: 1–18

作者简介 韩艳刚, 男, 1991年生, 博士研究生. 主要从事树木年轮生态学与植物生理生态学研究. E-mail: hyghan@163.com

责任编辑 孙 菊

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. 应用生态学报, 2021, **32**(10): 3397–3404

Han Y-G, Gai X-R, Qiu S-Y, et al. Spatial and temporal variations of the responses of radial growth of *Larix gmelinii* to climate in the Daxing'anling Mountains of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(10): 3397–3404

(C)1994–2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>