

升温突变对杜香—兴安落叶松林生长的影响

巴登花, 王飞*, 陈锐, 刘杰, 杨宇航

(内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘要: 以杜香—兴安落叶松为研究对象, 运用 Pearson 相关分析和滑动相关分析等方法, 探讨了树木径向生长与气候因子之间的相关关系, 并分析了其对气候突变的响应。结果表明: (1) 在突变检验中, 年降水量没有发生明显的突变现象, 年平均气温在 1986 年出现了突变点, 与突变前相比温度升高了 1.8 °C; 突变后的轮宽指数为 1.05, 明显大于突变前, 说明升温促进了兴安落叶松的生长。(2) 径向生长对温度的表现较为敏感, 特别是受生长季温度的控制较为突出。在气温突变前后, 径向生长与气候因子之间的相关性存在明显差异; 突变前, 径向生长与月气候因子之间的相关性不显著; 而突变后, 径向生长对降水量、平均气温和平均最低气温响应的敏感性均有所增强; 径向生长与当年 4 月的降水量、当年 5 月和 8 月的平均气温、上年 9 月和 8 月的平均最低气温均呈显著正相关, 而与当年 5 月的平均最低气温呈极显著正相关。(3) 在滑动相关分析中径向生长对气温和降水量的反应都有所增强, 特别是在冬季, 气温对树木径向生长的负面影响更加明显, 而在生长季前期, 降水量对树木径向生长的促进作用更加显著。

关键词: 杜香—兴安落叶松; 径向生长; 气温突变; 响应关系

中图分类号: S791.222 文献标志码: A 文章编号: 1001-8581(2023)02-0140-08

Effect of Abrupt Change in Temperature Rise on Growth of *Ledum palus-Larix gmelinii* Forest

BA Deng-hua, WANG Fei*, CHEN Rui, LIU Jie, YANG Yu-hang

(College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: In the paper, the *Ledum palus-Larix gmelinii* was taken as the research object. The correlation between radial growth of trees and climate factors was studied, and its response to abrupt climatic changes was analyzed by Pearson and sliding correlation analysis. The results showed that: (1) In the mutation test, the precipitation did not have a significant mutation, but the mean temperature had a significant mutation in 1986, which was 1.8 °C higher than that before the mutation. The wheel width index after mutation was 1.05, which was significantly higher than before mutation, indicating that temperature rise also promoted the growth of larch correspondingly. (2) The radial growth of larch was sensitive to temperature, especially the temperature in the growing season. The correlation between chronology and climate factors was significantly different before and after the abrupt temperature change. Before the abrupt change, there was no significant correlation between chronology and climate factors. After the mutation, the sensitivity of chronology to precipitation, mean temperature and minimum temperature increased. It was mainly positively correlated with precipitation in April of the current year, average temperature in May and August of the current year, average minimum temperature in September and August of the previous year, and extremely significantly positively correlated with average minimum temperature in May of the current year. (3) In sliding correlation analysis, the response of radial growth to both temperature and precipitation increased. Especially in winter, the negative effect of air temperature on the radial growth of trees was more obvious, and in the early growing season, precipitation also had a more significant promoting effect on the radial growth of trees.

Key words: *Ledum palus-Larix gmelinii*; Radial growth; Abrupt change in temperature; Response

0 引言

全球气候变暖在当前是一个不可争议的事实,

已受到人类社会的普遍关注。根据最新的 IPCC(AR6) 可知, 全球平均气温较 1850—1900 年的平均气温

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(RZ2100002282)。

作者简介: 巴登花(1998—), 女, 新疆温泉人, 硕士研究生, 研究方向为森林结构与功能。*通信作者: 王飞。

上升了约 1 °C, 未来全球气温上升预计达到或超过 1.5 °C^[1-2]。全球气候变暖导致干旱事件逐年增加, 部分森林树种已经出现了衰退的现象, 生态系统的结构和功能也发生了变化^[3]。全球气候变暖对森林生态的影响始终是学者们的研究议题, 人类活动已经导致了极端事件频繁发生, 整个环境系统也相应地做出了反应^[4]。森林生态系统是最复杂的陆地生态系统之一, 水循环、固碳、气候调节、生物多样性保护以及生态系统服务的提供都非常重要, 对于我们的生活具有不可替代的作用^[5-6]。目前的科学研究证明, 气候变暖已在不同程度上影响了世界各地所有种类的林木, 全球气候变暖趋势的加剧将对森林产生毁灭性的影响。

由于树木年轮具有定年精度高、分辨率高、连续性强、易于复本等优点, 在林木对外界的影响和对环境的影响方面得到了广泛的应用^[7]。国内学者对树木年轮学的研究工作始于 20 世纪 30 年代^[8], 现已取得了一定成果。树木生长与气候之间的关系并不稳定, 林木径向生长可能会因不同海拔、径级、年龄、坡向、竞争强度、林型以及树种而对气候产生不同程度的响应^[9-14]。气候变化可能会对树木造成巨大的影响, 这种影响较为复杂^[15-16]。当气温升高时, 树木的生长可能会受到气候因素的影响, 并且这种影响可能会有所改变。Buntgen 等^[17]研究认为, 随着气候变暖, 树木生长更容易受到温度的影响, 而且对降水的需求量会更大。然而刘蕊等^[18]的研究得出了相反的结论。即使是同一地区的同一树种对气温升高的敏感性也不尽相同^[19]。通过研究树木年代学, 可以探究树轮年表与气候因子之间的关联, 从而更好地理解气温升高对区域植被的影响。

目前, 大兴安岭地区的树轮气候学研究多集中于不同海拔、纬度、树种、坡向等条件下树木径向生长与气候因子之间的关系, 并尝试重建这些信息。其中, 兴安落叶松、樟子松和山杨是最受关注的研究对象^[20-24]。尽管已有很多学者尝试探究这些树种对气候变化的响应, 并取得了一些成果, 但仍有很大的改进空间。随着气候变暖的加剧, 对杜香—兴安落叶松树木径向生长的响应和敏感性的研究仍然相对较少。所以本研究以杜香—兴安落叶松 (*Ledum palus-Larix gmelinii* Rupr. Kuzen) 为研究对象, 使用树木年轮学的分析方法, 创建标准化的树木年轮年表, 通过这个年表可以更好地了解兴安

落叶松的径向生长对气候变化的响应, 进而能够为大兴安岭地区的树木年轮研究提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区坐落于内蒙古大兴安岭地区的根河林业局潮查林场, 其地理位置为 50° 56' 25" N, 121° 30' 31" E, 海拔高度在 740~972 m。该区域是典型的季风气候区, 具有明显的季节性, 冬季长, 夏季短, 最低气温达到 -58 °C, 年降雨量介于 450~550 mm。杜香—兴安落叶松林在大兴安岭地区广泛分布, 生境湿润, 是该地区的重要森林类型。这种植物主要生长在阴坡下部, 土壤层非常薄, 永冻层的溶解度也比较低, 因此生存环境比较寒冷潮湿, 生长条件也比较恶劣。由于杜香和其他灌木的存在, 落叶松的根系可能会在土壤中形成一个厚实的盘状结构, 导致其他草本植物无法生长。

1.2 调查取样与年轮测定

于 2021 年 8 月在内蒙古大兴安岭地区根河林业局潮查林场境内选取 45 株生长良好、胸径较大的兴安落叶松优势木, 用生长锥在胸径 (1.3 m) 处沿东西、南北 2 个方向各取树芯, 每棵树钻取 2 个树芯, 共 90 个。将采集到的样品封存在内径大于样品的塑料吸管中, 并封口标注样品编号信息。将采集的树芯样品运送回实验室进行内业处理, 按 Stokes 等^[25-26]的研究方法进行处理。将所采集的样品粘在定制的木槽内, 晾干后打磨抛光 (直至能够在显微镜下清晰分辨年轮), 利用 LINTAN 6 宽度测量仪在显微镜下目测年轮, 然后进行树轮宽度的测量 (精确度为 0.001 mm)。所有测量数据均使用 COFECHA 程序^[26]进行质量控制, 以确定缺失年轮的样本。最终, 将有年轮的 67 根树芯用于建立年表。使用 ARSTAN 程序^[27]中的负指数函数, 去除树木生长趋势并进行标准化处理, 得到 3 个不同的树轮年表, 并对其进行标准化年表 (STD) 研究。

1.3 气候数据

气候资料均来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 选用根河市 1969—2020 年的气象数据, 选取月平均气温、最低气温、最高气温和降水量等数据进行研究。在以往的研究中普遍会考虑到气候因子对树木生长产生的“滞后效应”^[28], 因此本研究选用研究时段内上年 6 月至当年 9 月的气象数据进行分析。多年平均气候因子的变化如图 1 所示。由图 1 可以看出: 该区域具有雨热同期的规律, 年平

均气温为 $-5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,最高气温达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。降水主要集中在6—8月,最大降水量出现在7月,8月份以后降水逐渐减少,1月份降水量最低。

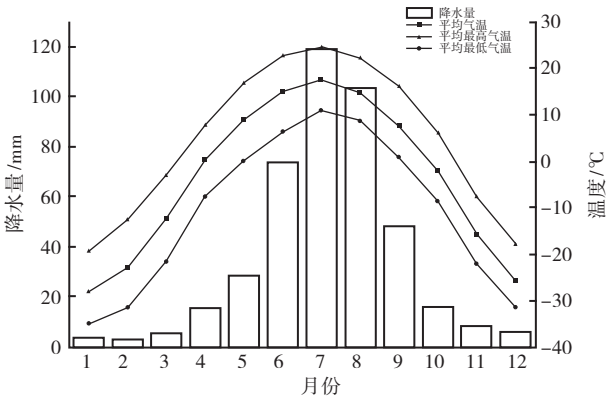


图1 1969—2020年根河市气候的总体变化

1.4 数据分析

用Mann-Kendall检验方法对1969—2020年根河市的气候变化特性进行突变分析,并同时采用滑动 t 检验进一步分析,进而增加其突变点的可信度,从而确定可能发生气温突变的年份,并在MATLAB软件中完成。

利用IBM SPSS Statistics 22软件中的皮尔逊(Pearson)相关性分析法对年轮指数和各个气候因素之间的关系进行分析,采用Origin 2019b和TBtools软件进行绘图。

通过 μ 值计算检验了温度突变前后2个时段内树轮年表与相同气候因子间相关系数的变化情况。 μ 值是标准正态分布的分位数,计算公式为:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{1+r_1}{1-r_1}\right) - \ln\left(\frac{1+r_2}{1-r_2}\right)}{2 \times \sqrt{\frac{1}{n_1-3} + \frac{1}{n_2-3}}}$$

其中, r_1 和 r_2 分别表示2个时段内树轮年表与气候因子之间的相关系数; n_1 和 n_2 分别表示2个时段内的样本数量。如果 $|\mu| > 1.96$,则表明2个时段内树轮年表与相同气候因子之间的相关系数存在显著差异($P < 0.05$)^[29]。同时,以30 a为滑动窗,在R语言中分析不同时期树轮宽年表与气候因子的滑动相关性。

2 结果与分析

2.1 气候变化特征分析

对研究区1969—2020年的年平均气温与年降水量进行M-K检验和滑动 t 检验,M-K检验的结果

为:年降水量没有发生比较明显的突变现象,而年平均气温在1986年出现了突变点(图2)。滑动 t 检验的结果为:自1969年以来,年平均气温的 t 统计量有1处值超过了0.01的显著性水平,1987年有1个负值出现;自1969年以来,年降水量在接近2000年的位置超过了0.01的显著性水平,但不突出(图3)。利用滑动 t 检验进一步分析证实了M-K检验突变点的可信度,年平均气温在1985—1987年这个区间有突变发生,因此本研究取中间的1986年为突变年。1969—2020年年平均气温为 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,1969—1986和1987—2020年年平均气温分别为 -5.0 和 $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,突变后较突变前升高了 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1969—1986年平均年降水量达 452.1 mm ,1987—2020年平均年降水量达 436.8 mm ,无明显变化。

2.2 树轮年表统计特征

本研究结合树木年轮学的方法对轮宽数据进行处理,获得了相应的3个年表,其中本文采用标准年表进行分析,其特征值的分析结果如表1所示。年表的时间范围为1855—2021年,公共区间为1927—2019年,平均值为0.989,标准差为0.186,表明该采样点树轮宽度年表中包含了大量有关气候变化的信息。平均敏感度表示年轮的时间序列对气候信息方面所表现出的敏感程度,年表所示的平均敏感度为0.14。一阶自相关系数主要反映上年气候变化是否持续影响树木年轮的生长,一阶自相关系数为0.484。所有样芯平均相关系数为0.336,树间的平均相关系数为0.336。通常信噪比越高,气候对树木生长的影响就越大^[30]。经过比较发现STD年表的信噪比大,为31.35。年表中的总体代表性为0.969,大于0.85,说明树木年轮的宽度年表中存在区域代表性。第一主成分所占的方差量为36.53%,在相应的年表中包含了一定的气候信息,是比较适宜于气候因子响应分析的。同时,由杨镒如等^[31]的研究结果“ $\text{EPS} > 0.85$ ”可知,年表可靠区间为1927—2019年。

2.3 径向生长年表与气候因子的相关关系

由图4可以看出,研究期内除前1年6月和12月之外,径向生长与降水量之间的相关性整体表现较低,这主要是因为兴安落叶松自身的生境处于一个较为湿冷的状态,冬季的积雪因其永冻层顶面埋藏的深度较浅导致水分的滞留,因此降水量对径向生长的影响不显著。径向生长与前1年9月的平均气温呈显著正相关,与当年5月和8月的

平均气温均呈极显著正相关。径向生长与前1年6月以及当年1月和8月的月平均最低气温均呈显著正相关,与当年5月的月平均最低气温呈极显著正相关。径向生长与前1年9月的月平均最高气温呈显著正相关,与当年5月和8月的月平均最高气温均呈极显著正相关。上述分析表明该研究区树木生长受温度的影响较为显著。

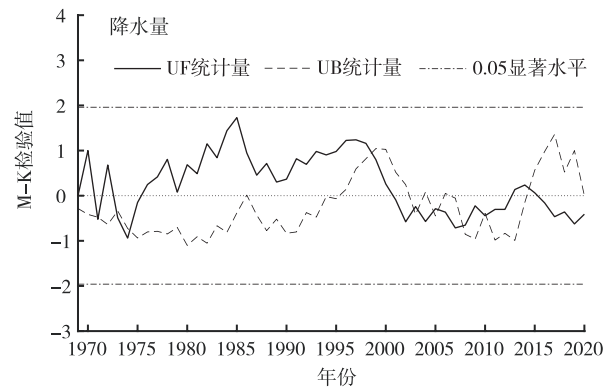
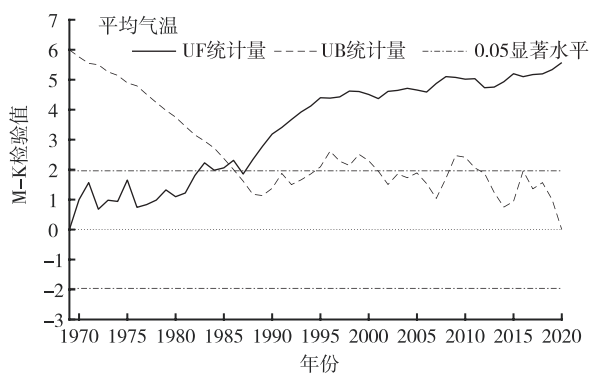
2.4 气温突变前后年表与气候因子的相关关系

气温突变前后标准年表与气候因子的相关性分析如图5所示:在气温突变前(1969—1986年),年表指数与其月降水量、月平均气温、月平均最低气温和月平均最高气温的相关关系并不显著。但在气温突变后(1987—2020年),年表指数与当年4月的降水量呈显著正相关,与当年5月和8月的平均气温均呈显著正相关;年表指数与前1年9月和当年8月的平均最低气温均呈显著正相关,与当年5

月的平均最低气温呈极显著正相关。上述分析表明在升温突变后该研究区兴安落叶松受春季干旱的影响呈明显加剧的趋势。

表1 年表统计特征

统计特征	STD
年表研制样本量/(树/芯)	38/65
序列长度	1855—2021年
公共区间	1927—2019年
均值	0.989
标准差	0.186
平均敏感度	0.140
一阶自相关系数	0.484
所有样芯平均相关系数	0.336
树间平均相关系数	0.336
信噪比	31.350
总体代表性	0.969
第1主成分所占的方差量/%	36.53



UF表示正常的统计值时间序列;UB表示逆序的统计值时间序列。

图2 根河气象站1969—2020年年平均气温和年降水量M-K检验结果

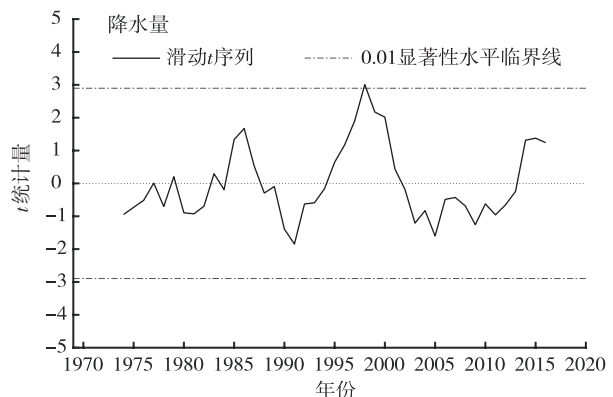
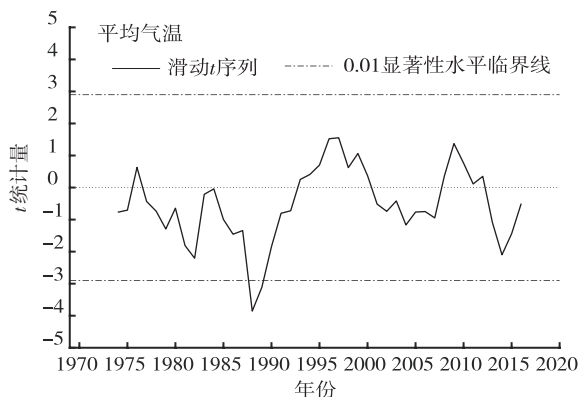
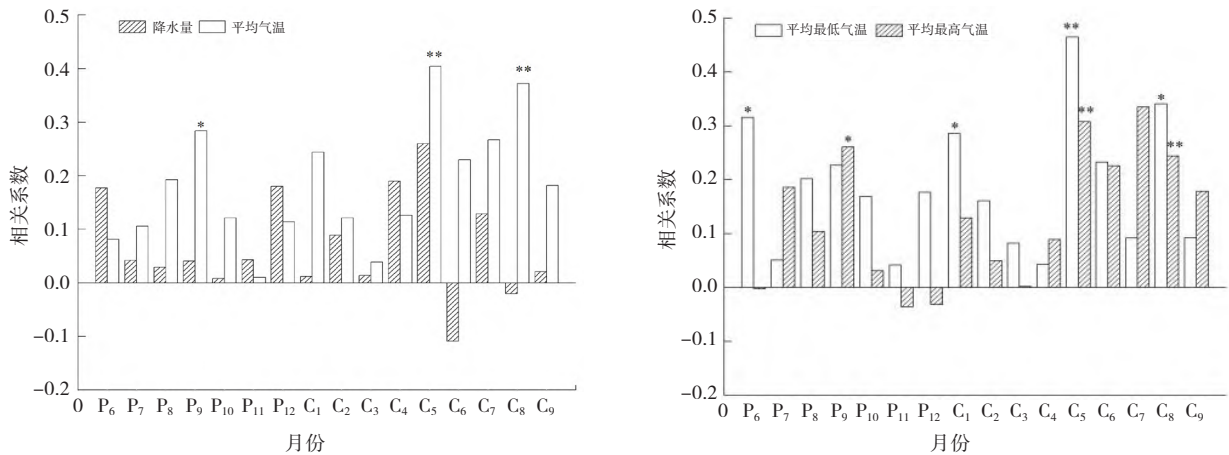


图3 根河气象站1969—2020年年平均气温和年降水量滑动t检验结果

利用 μ 值计算检验的方法对气温突变前后2个时段内不同温度条件下的兴安落叶松年表指数和同一气候因素之间的相关性进行了分析。结果 $|\mu| > 1.96$,说明2个时段内的树木年表与同一气候因素之间存在显著的相关性($P < 0.05$)。而气温

突变前后的年表指数与月平均气温、月平均最高气温之间的相关性没有明显变化,但与当年4月的降水量的相关性却有明显变化,与前1年9月、当年2月的平均最低气温的相关性也有明显变化(表2)。



P表示前1年; C表示当年; 数字表示月份; *、**分别表示在0.05和0.01水平上相关显著。下同。

图4 树木径向生长与月气候因子的相关性(1969—2020年)

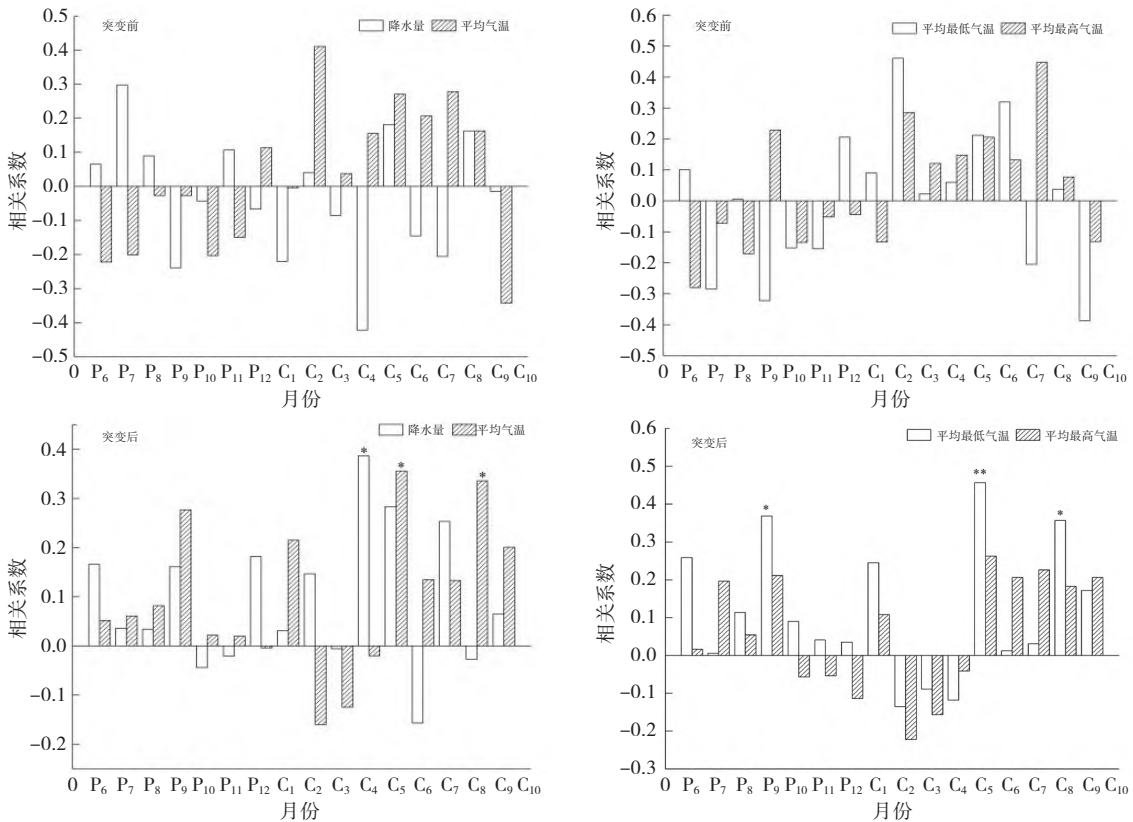


图5 标准年表(STD)与月气候因子的相关性(1969—1986和1987—2020年)

2.5 树轮宽度年表与气候因子的动态关系

通过滑动相关分析(图6)可知,随着气温的升高,树轮宽度年表对水—热因子反应的敏感性呈递增趋势。杜香—兴安落叶松树轮宽度年表与降水量分别在1981—2013年4个时段内的前1年12月、1979—2008年1个时段内的当年1月、1984—2013年1个时段内的当年2月和1982—2019年9个时段内的当年4月均呈显著正相关;且在1972—2005年4个时段内的当年6月呈显著负相关。年表

与平均气温分别在1974—2006年3个时段内的当年2月、1971—2011年10个时段内的当年3月呈显著负相关(其中不包含1979—2009年时段);且与1984—2014年3个时段内的当年5月、1982—2011年1个时段内的当年6月呈显著正相关。杜香—兴安落叶松树轮宽度年表与月平均最低气温分别在1974—2006年3个时段内的当年1月、1971—2007年7个时段内的当年2月呈显著负相关,且与1981—2020年时段内的当年4月(其中

不包含 1983—2012 年时段) 和 1975—2007 年 5 个时段内的当年 7 月呈显著正相关; 当年 7 月的年表与月平均最低气温间的相关性由之前的正相关在 1991—2020 年 1 个时段内转变为显著正相关。杜香—兴安落叶松树轮宽度年表与月平均最高气温分别在 1972—2014 年 10 个时段内的当年 2 月(其中不包含 1978—2009 年和 1983—2012 年时段) 和 1972—2013 年 10 个时段内的当年 3 月(其中不包含 1979—2009 年和 1983—2012 年时段) 呈显著负相关, 且与 1982—2012 年 2 个时段内的当年 6 月、1978—2008 年 2 个时段内的当年 7 月和 1978—2009 年 3 个时段内的当年 8 月呈显著正相关。

3 讨论

在全球气候逐渐变暖的背景下, 内蒙古地区的气温同样呈现出逐年上升的趋势^[32-33]。本研究通过 M-K 检验和滑动 *t* 检验对气温和降水进行突变检验分析后, 发现研究区平均气温在 20 世纪 80 年代至 90 年代开始发生快速升温的现象^[34], 气温突变年份为 1986 年。从选取的气象资料来看, 研究区近 50 a 来的气温呈现出上升的趋势, 这和周莹等^[35]

对内蒙古地区气候突变的研究结果较为一致。相关研究表明, 不同的林型对气温、降水量等气候因子产生的影响也不同^[36]。

表 2 标准年表与相同月气候因子相关系数的差异性检验结果 (1969—1986、1987—2020 年)($|\mu|$)

月份	降水量	平均气温	平均最低气温	平均最高气温
P ₆	△	△	△	△
P ₇	△	△	△	△
P ₈	△	△	△	△
P ₉	◇	◇	▲	△
P ₁₀	△	△	△	△
P ₁₁	△	△	△	△
P ₁₂	△	△	△	△
C ₁	△	△	△	△
C ₂	△	□	▲	△
C ₃	△	△	△	△
C ₄	▲	△	△	△
C ₅	△	△	△	△
C ₆	△	△	◇	△
C ₇	□	△	△	△
C ₈	△	△	◇	△
C ₉	△	□	◇	◇

注: △表示 0~0.99; ◇表示 1.00~1.49; □表示 1.50~1.95; ▲表示 > 1.96。

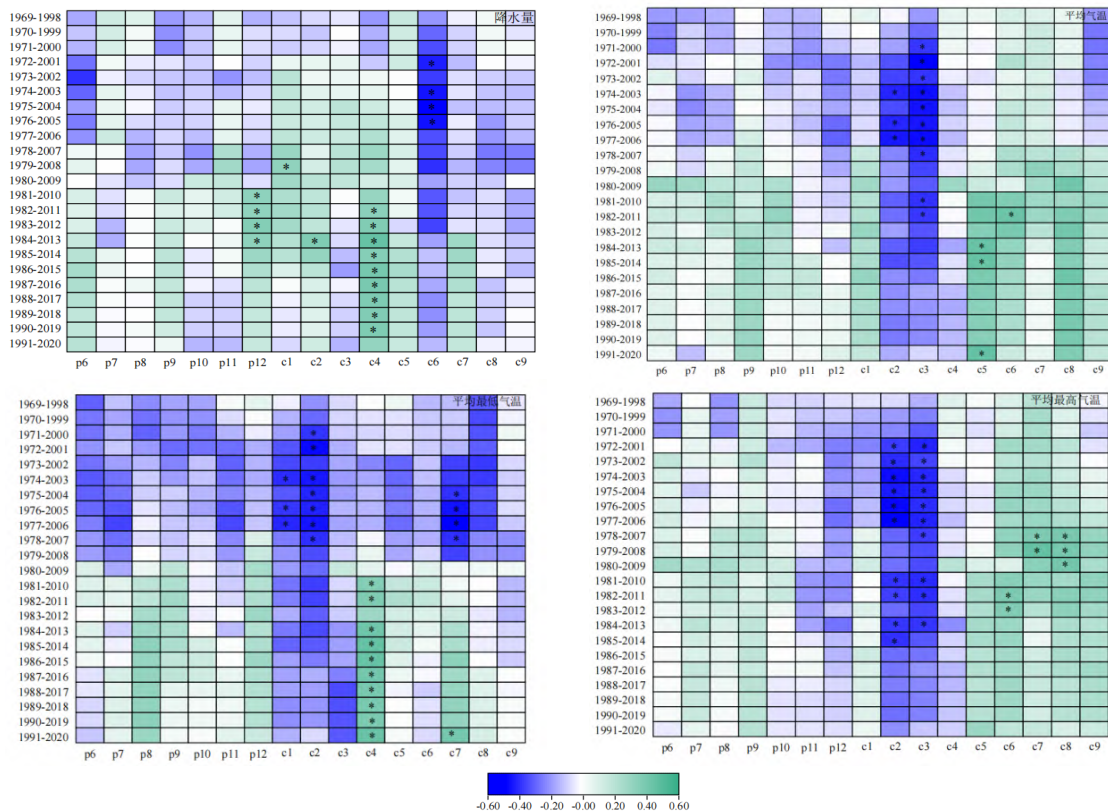


图 6 树木年轮宽度年表与月气候因子滑动的相关性 (1969—2020 年)

相关性分析的结果显示: 温度是影响该研究区杜香—兴安落叶松生长的主要因子, 在气温突变

前, 树木的径向生长对月平均气温、月降水量和月平均最低气温、月平均最高气温的响应都没有明显

的变化;但在气候发生突变后由不相关转变为显著正相关,这种变化在生长季前期和生长季呈现得较为显著。由于该研究区冬季时间漫长,温度偏低,土层较浅薄,永冻层的溶解层较浅,生境相对较为湿冷。长期处于这种生境状态下,植被叶肉细胞中的原生质就会脱水,树木的根部就会因为土壤结冰而冻死,导致树木下1年的光合作用减弱,生长周期会变得越来越短,从而形成窄轮^[37]。但突变后,温度的升高会避免土壤结冰,从而减少对树木根部的伤害。升温突变不仅能促进植物的光合作用和有机物的合成与储存,还能加速冰雪的融化速度,增加土壤中的含水量,维持植物正常的代谢和活动,使树木在下1年能够更好地生长^[38],这可能是造成由突变前的不相关转变为突变后的显著正相关的原因。在 μ 值检验分析中,树轮年表与秋季、冬季月平均最低气温和春季降水量之间呈现出显著的相关性,进一步证实了随着气温的上升,树木的径向生长在突变后主要还是受温度的影响。此外,树木的生长不仅受气候因子的影响还会受到所处生境的影响,当前研究区的生境也是影响兴安落叶松径向生长与气候之间响应的关键,对此还需要进一步的研究与探讨。

滑动相关分析表明:年表指数与月平均气温和月平均最高气温在前1年冬季均呈显著负相关,与当年生长季呈显著正相关,生长季温度的升高有利于树木进行光合作用并帮助其生长;但温度过高会提升植物呼吸和蒸腾作用的强度,这样会大大消耗植物的养分和水分,降低自身有机物质的累积^[39-40]。年表指数与降水量在前1年冬季以及生长季均呈显著正相关,前1年冬季的气候变暖可以很好地保护树木根部不受霜冻的伤害,促进生长季前期树木的生长;但在当年生长季里呈显著负相关,持续的温度变暖则会使得降水量减少,相应地对树木的生长起到一定的抑制作用,从而形成窄轮;与月平均最低气温在上1年的冬季呈显著负相关,与生长季呈显著的正相关,到当年的生长季则从前期的显著负相关转变为正相关;冬季气候变暖会对耐寒树木的正常生理生长构成严重的威胁^[41]。

兴安落叶松在冬季生长的时间可长达5个月左右^[42],但在20世纪80年代后根河市冬季呈现出明显偏短的趋势^[43]。冬季变暖也会造成干旱,同时对高纬度和高海拔树木的影响强于寒冷造成的影响^[44-45]。冬季的积雪和冻土融化是供应大兴安岭地

区树木在生长季前期所需水分的主要来源^[46]。但同样重要的是,冬季持续的变暖也会导致积雪减少和植物群落结构的变化^[47]。积雪的减少意味着在来年生长季前期供应给植物的水分相应减少,与此同时,光、温度、水等因子的分配也会发生不同的变化,从而影响植物的正常生长^[48]。由以上分析可知,温度和降水同时影响着兴安落叶松的生长,而温度是产生较大影响的因子,在冬季对气候变暖所表现的响应较为突出。

4 小结

近年来,气候变暖已影响到杜香—兴安落叶松的正常生长趋势,其生长受温度因素的影响较为突出,在气候因子中温度是研究区最为显著的影响因素。气温突变(1986年)前,杜香—兴安落叶松径向生长对气候因子的响应均未发生明显的变化;但在突变后对气候因子的响应均发生了显著变化,主要还是受春夏季温度的控制。通过 μ 值检验的进一步分析可知,1969—1986和1987—2020年2个时段里的树轮年表与气候因子的相关系数有着较为显著的差异,主要与当年的月平均最低气温和降水量间的相关性有显著的变化。研究区内落叶松径向生长对气温和降水量的响应在近年来都有所增强,随着气温的不断上升,导致积雪与降雨量的减少,进而造成“干旱胁迫”的发生,从而使树木生长受到抑制,长此以往可能会影响到整个森林生态系统。树木的生长不仅受限于气候的胁迫,还受限于自身因素以及所处生境胁迫的影响。因此,在今后考虑对不同林型兴安落叶松以及不同生境的树种在气候突变前后径向生长与气候因子的关系进行深入探讨,进一步为森林生态系统的防护工作提供相应的理论依据。

参考文献:

- [1] 马占云,任佳雪,陈海涛,等. IPCC第一工作组评估报告分析及建议[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2550-2558.
- [2] Landman W. Climate change 2007: The physical science basis [J]. South African Geographical Journal, 2010, 92(1): 86-87.
- [3] 刘亚玲,信忠保,李宗善,等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 11830-1840.
- [4] 陈姣,张耀存. 气候变化背景下陆地极端降水和温度变化区域差异[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 955-968.
- [5] 冷文芳,贺红士,布仁仓,等. 气候变化条件下东北森

- 林主要建群种的空间分布[J].生态学报,2006,26(12):4257-4266.
- [6] 刘国华,傅伯杰.全球气候变化对森林生态系统的影响[J].自然资源学报,2001(1):71-78.
- [7] Helman D, Lensky I M, Yakir D, et al. Forests growing under dry conditions have higher hydrological resilience to drought than do more humid forests [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2801-2817.
- [8] 王树芝. 树木年代学研究进展[J].考古,2001(7):47-54.
- [9] 薛儒鸿,焦亮,刘小萍,等.新疆阿尔泰山不同海拔西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性评价[J].生态学杂志,2021,40(5):1275-1284.
- [10] 康剑,梁寒雪,蒋少伟,等.竞争和气候对新疆阿尔泰山西伯利亚五针松树木径向生长的影响[J].植物生态学报,2020,44(12):1195-1202.
- [11] 姜庆彪,赵秀海,高露双,等.不同径级油松径向生长对气候的响应[J].生态学报,2012,32(12):3859-3865.
- [12] 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[J].东北林业大学学报,2014,42(12):13-17,21.
- [13] 陈列,高露双,张赟,等.长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系[J].生态学报,2013,33(4):1285-1291.
- [14] Wang X, Zhang Y, Merae D J. Spatial and age-dependent tree-ring growth responses of *Larix gmelinii* to climate in northeastern China [J]. *Trees*, 2009, 23(4): 875-885.
- [15] 方克艳,陈秋艳,刘昶智,等.树木年代学的研究进展[J].应用生态学报,2014,25(7):1879-1888.
- [16] 于健,徐倩倩,何秀,等.长白山东坡落叶松树轮宽度对气候响应的分离效应[J].中南林业科技大学学报,2013,33(3):89-97.
- [17] Buntgen U L F, Frank D C, Schmidhalter M, et al. Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology [J]. *Trees*, 2006, 20(1): 99-110.
- [18] 刘蕊,王勇辉,姜盛夏,等.哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应[J].干旱区研究,2019,36(3):723-733.
- [19] Leonelli G, Pelfini M, Battipaglia G, et al. Site-aspect influence on climate sensitivity over time of a high-altitude *Pinus cembra* tree-ring network [J]. *Climatic Change*, 2009, 96(1/2): 185-201.
- [20] 王彦平,赵子威,李洪峰.大兴安岭地区不同海拔高度木本植物物候期及其对气候变化的响应[J].江西农业学报,2022,34(4):172-179.
- [21] 张朋磊,刘滨辉.气候变化对不同纬度兴安落叶松径向生长的影响[J].东北林业大学学报,2015,43(3):10-13,22.
- [22] 张先亮,何兴元,陈振举,等.大兴安岭山地樟子松径向生长对气候变暖的响应:以满归地区为例[J].应用生态学报,2011,22(12):3101-3108.
- [23] 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.
- [24] 吕姗姗,王晓春.大兴安岭北部阿里河樟子松年轮气候响应及冬季降水重建[J].东北师大学报:自然科学版,2014,46(2):110-116.
- [25] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree-ring dating [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1968: 56-57.
- [26] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-ring Bulletin*, 1983, 44(1): 69-75.
- [27] Cook E R. A time series analysis approach to tree ring standardization [D]. Tucson, Arizona, USA: University of Arizona, 1985: 63-73.
- [28] Fritts H C. Tree rings and climate [M]. Caldwell: The Blackburn Press, 1976: 567.
- [29] Lindeman R H, Merenda P F, Gold R Z. Introduction to bivariate and multivariate analysis [M]. Glenview Illinois: Scott, Foresman, 1980.
- [30] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [31] 杨镒如,张茗珊,张凌楠,等.秦岭中西部油松径向生长对气候因子的响应差异研究[J].生态学报,2022,42(4):1474-1486.
- [32] 尤莉,戴新刚,邱海涛.1961—2006年内蒙古年平均气温突变分析[J].内蒙古气象,2010(2):3-5.
- [33] 姜艳丰,尤莉,贾成朕,等.1961—2018年内蒙古年平均气温突变前后变化特征[J].内蒙古气象,2019(5):14-17.
- [34] 代海燕,边玉明,安莉娟,等.气候变暖背景下内蒙古大兴安岭生态功能区冷暖急转气候特征[J].冰川冻土,2018,40(5):892-898.
- [35] 周莹,马龙,梁珑腾.内蒙古气温突变及其影响因子间的响应关系[J].水土保持研究,2021,28(3):184-193.
- [36] 青梅.大兴安岭兴安落叶松生长对气候变化的响应[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [37] 孙毓,王丽丽,陈津,等.中国落叶松属树木年轮生长特性及其对气候变化的响应[J].中国科学:地球科学,2010,40(5):645-653.
- [38] 李静茹,彭剑峰,杨柳,等.川西高原两种针叶树径向生长对气候因子的响应[J].应用生态学报,2021,32(10):3512-3520.

(下转第 153 页)

- [J]. *Science*, 1978, 199(4326): 253–258.
- [6] 杨绪红, 金晓斌, 刘晶, 等. 土地利用碳排放核算系统设计及实现[J]. *测绘通报*, 2019(4): 54–59.
- [7] 李嘉乐, 胡红兵. 近20年武汉市土地利用碳排放时空演变分析[J]. *低碳世界*, 2022, 12(5): 4–9.
- [8] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(149): 7297–7316.
- [9] Cao W, Yuan X. Region–county characteristic of spatial–temporal evolution and influencing factor on land use–related CO₂ emissions in Chongqing of China, 1997~2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 619–632.
- [10] 马远, 刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(7): 35–43.
- [11] 张玥, 代亚强, 陈媛媛, 等. 土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(6): 100–112.
- [12] 韩璇, 宋宇加. 基于净生态系统生产力模型的山西省不同土地利用类型碳足迹分析[J]. *江西农业学报*, 2022, 34(3): 214–220.
- [13] 张明鑫, 谢树春, 李陇堂. 宁夏中卫市沙坡头区近13年土地利用空间布局变化及环境健康效应[J]. *经济地理*, 2016, 36(2): 176–181.

(责任编辑: 黄荣华)

(上接第 147 页)

- [39] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, et al. Tree growth and time–varying climate response along altitudinal transects in central China [J]. *European Journal of Forest Research*, 2010, 129(6): 1181–1189.
- [40] 赵志江, 郭文霞, 康东伟, 等. 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[J]. *林业科学*, 2019, 55(7): 1–16.
- [41] Williams C M, Henry H A, Sinclair B J. Cold truths: How winter drives responses of terrestrial organisms to climate change [J]. *Biological Reviews*, 2015, 90(1): 214–235.
- [42] 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.
- [43] 王寿辉, 孙蕾. 简析根河市气象四季划分[J]. *南方农机*, 2019, 50(15): 234.
- [44] Domisch T, Martz F, Repo T, et al. Winter survival of Scots pine seedlings under different snow conditions [J]. *Tree Physiology*, 2018, 38(4): 602–616.
- [45] Charrier G, Ngao J, Saudreau M, et al. Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology, and frost resistance in trees [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1–18.
- [46] Li W Q, Yuan J, Dong M Y, 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 [J]. *Dendrochronologia*, 2021, 65: 1–10.
- [47] 宗宁, 石培礼. 冬季升温对高山生态系统碳氮循环过程的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(9): 3131–3143.
- [48] 陈文年, 吴彦, 吴宁, 等. 融雪时间对大卫马先蒿生长和繁殖特性的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3621–3628.

(责任编辑: 管珊红)