

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220467

内蒙古罕山华北落叶松径向生长特征及水热环境响应

陈佳佳¹, 周梅¹, 赵鹏武^{1*}, 许重阳², 石亮²,
宝虎³, 刘艳军⁴, 曹光明⁴

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100872;
3. 通辽市林业科学研究院 内蒙古特金罕山森林生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 通辽 028000; 4. 内蒙古通辽市
扎鲁特旗罕山林场, 内蒙古 通辽市扎鲁特旗 029100)

摘要: [目的] 以内蒙古罕山保护区为例, 系统探讨我国北方半干旱区华北落叶松树干径向生长的变化规律及与环境因素(温度、降水等)的关系, 为进一步认识半干旱区树木生长对气候变化的响应提供理论基础。[方法] 在通辽市扎鲁特旗罕山国家级自然保护区, 运用点触式树木径向生长测量仪对4株样树的径向生长开展了高分辨率的连续监测, 并同步监测温度、降雨、土壤水分等环境因子, 分析树木径向生长动态特征及影响因素。[结果] 研究表明: 华北落叶松径向生长具有白天收缩、夜间膨胀的日变化特征。在5—6月的树干收缩膨胀现象较7—9月更明显, 且夜间膨胀量大于日间收缩量; 在整个生长季尺度, 华北落叶松的径向生长始终受到土壤温度的显著影响, 但在不同生长阶段, 土壤含水量是影响树干径向生长的重要因子。在极端丰水年(2021年)的生长季中的降雨高峰期之前(5月初—6月中), 径向生长已达全年生长量的45%以上, 说明土壤水分对径向生长的影响更直接, 夏季降水量的直接影响较小, 而冬季积雪在春季融化后的土壤水分供应则是决定径向生长的关键因子。[结论] 在内蒙古半干旱地区, 当年降水量对华北落叶松径向生长的直接贡献相对较小, 主要是通过转化成土壤水的形式间接影响树木生长; 土壤温度和土壤水分是影响径向生长的重要因子, 在土壤水分未得到降雨有效补充的生长季初期, 树木径向生长主要依靠土壤水的前期存量。

关键词: 中国北方半干旱区; 华北落叶松人工林; 树木径向生长; 水热环境因子变化

中图分类号: S718

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)04-0050-09

近几十年, 气候变化导致陆地生态系统的持续性与稳定性持续下降^[1-2]。森林作为陆地生态系统碳汇的重要组成部分, 其生长动态对气候变化十分敏感^[3]。在我国北方半干旱地区, 气候变暖导致的水分匮乏加剧, 逐渐对树木生长、森林碳汇产生限制作用, 部分地区的人工林甚至出现生长衰退或大面积死亡^[4-5]。探究树木径向生长与气候因子的关系, 有助于理解树木生长对气候变化的响应, 更准确地预测未来气候变化背景下的森林动态。

近年来, 国内外开展树木径向生长与气候因子

关系的研究逐渐增多。在我国北方干旱区对祁连圆柏(*Juniperus przewalskii* Kom.)的监测表明, 水分是影响树木径向生长的主要气象因子^[6], 初夏降水是树干快速生长的重要驱动因素^[7]。而对祁连山东部青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)的研究表明, 在较强降水发生后的1~2 d内, 青海云杉树干吸水发生持续膨胀现象, 5月份降水量决定了当年树木最大生长速率出现的时间^[8]。在半湿润地区的研究则表明, 生长季土壤含水量是影响树木生长的关键因子^[9-10]。然而, 当前大多数研究重点关

收稿日期: 2022-09-26 修回日期: 2022-11-20

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2020ZY0024)、内蒙古自然科学基金面上项目(2020MS04011)、国家自然科学基金项目(41901057)、中国博士后面上基金(2020M680203)资助。

* 通讯作者: 赵鹏武, 硕士研究生, 高级实验师, 从事森林生态长期定位研究。Email: zhaopengwu12@163.com

注干旱区山地森林与半湿润区森林,对半干旱区森林的研究相对较少,管伟^[11]、熊伟^[12]等人对宁夏六盘山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)径向生长的监测表明,虽然降水和气温共同影响水分输送,但水分的影响更显著。在河北塞罕坝以樟子松为研究对象,研究结果表明以15天为时间尺度,温度对樟子松径向生长的影响显著^[13]。而半干旱区现有的树木生长研究集中在年际尺度下树木生长与气候因子的关系^[6-7],缺少在更高时间分辨率下树木径向生长的监测研究,限制着深入了解树木生长的内在驱动机制。运用树木径向生长测量仪(Dendrometer)可以高分辨率的连续监测树木径向变化和生长,明确年内径向生长动态,以便从机理上解释树木生长对气候条件变化的响应^[6]。

因此,本研究以内蒙古通辽市扎鲁特旗罕山国家级自然保护区(以下简称:罕山保护区)为研究地点,在华北落叶松人工林内监测树木径向生长的日动态和季节动态,并分析气象及土壤因子的影响,以便掌握研究区内树木径向生长变化规律及其影响因素,为进一步准确分析树木生长对气候变化的响应提供参数。

1 材料与方 法

1.1 研究地概况

研究区位于罕山保护区的华北落叶松人工林内(119°37'~120°06'E, 45°00'~45°26'N)。罕山保护区位于大兴安岭南部的兴安岭隆起地带,地处锡林郭勒草原与科尔沁草原交汇处。该保护区平均海拔939 m,属山地向平原、森林向草原过渡的典型区域。罕山保护区位于北温带,1月平均气温最低,为-23.7℃;7月平均气温最高,可达28℃。年均降水量378.9 mm,其中70%~80%的降雨集中于5—9月份。罕山保护区的乡土乔木树种主要有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)山杨(*Populus davidiana* Dode.)、大果榆(*Ulmus macrocarpa* Hance.)等。林下植被主要为虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne.)、照白杜鹃(*Rhododendron micranthum* Turcz.)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens* Turcz.)和草类^[4]。

1.2 数据采集

2020年8月在罕山保护区的华北落叶松人工林内布设30 m×30 m的样地,该林分郁闭度为

0.8,平均树高16 m。在样地内选择4棵平均木样树(表1),在胸高(1.3 m)处安装点触式树木径向生长仪(DC2, Ecomatik, 德国),每30 min记录一次数据;在4棵样树周围安装大气温湿度记录仪(HOBO pro v2 U23, Onset, 美国),观测空气温度(Ta)和相对湿度(RH);在样树附近地势平缓处挖一深90 cm的垂直剖面,埋放土壤温湿度记录仪(Em50/G, Decagon, 美国),监测10、20、40、60、90 cm深处的土壤温度和土壤含水量,同样每30 min记录一次数据,本研究只取深度40 cm处的土壤温度和含水量用于分析;降水数据来自罕山自然保护区的综合气象观测场的气象站(WS1000, 美国)。

表1 华北落叶松人工林的样木基本情况

Table 1 Basic information of the sampled trees of *Larix principis-rupprechtii*

样树编号 Tree number	胸径/cm DBH	树高/m Height	枝下高/m Clean height	树龄/a Tree age
L1	18.6	16.0	2.6	33
L2	16.0	17.0	3.2	33
L3	18.8	18.0	3.5	33
L4	18.2	16.5	1.8	33

1.3 数据处理及分析

本研究采用2021年5—10月观测的树干径向生长数据和气象因子数据进行分析。在日尺度上,将每日记录的48个值与每日的起始值相减,用于探讨其日变化动态;在季节尺度上,采用最大值法^[14]获得径向生长信息,即从每日的48个原始树干径向变化数据中提取最大值,计算连续两日最大值的差值,得到树干日径向变化量。因采集到的数据较为离散,无法在排除水分干扰后确定华北落叶松在某时间点的生长速率,所以用Gompertz生长模型(式1)对径向累积变化量进行拟合,然后分析树干径向生长过程^[8],对Gompertz函数进行一阶求导,得到树木生长速率曲线。将生长速率大于(4 μm·d⁻¹)的时期确定为主要生长时期^[15-16],籍此确定树木持续生长时间。

$$Y = Y_0 + A \times \exp[-\exp(\beta - kt)] \quad (1)$$

式中,Y为树干径向累积变化量;Y₀为下渐近线,代表树木生长季开始时的初始状态;A为上渐近线;β为与Y初始值有关的参数;k为生长率;t为年积日。

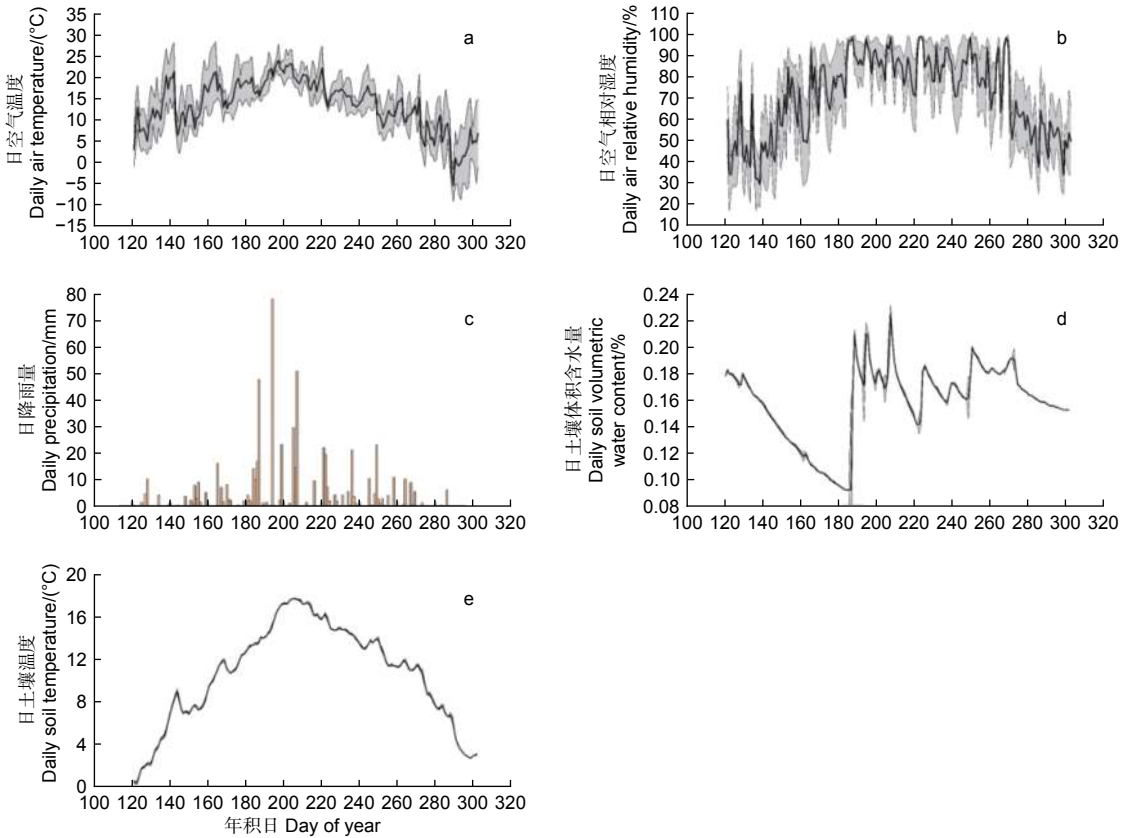
监测数据在 Excel 内进行整理, 利用 SPSS 24.0 和 Origin Pro 2022b 进行数据分析与绘图制作。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化特征

在 2021 年生长季 (5—10 月), 日最高温与

日最低温于 5 月 3 日均达到 0 ℃ 以上, 此后气温持续上升, 直至 7 月 16 日出现最高温 (30 ℃), 随后空气温度开始下降。研究期间日均气温为 14.3 ℃, 日最高气温为 30 ℃, 日最低气温为 -4.9 ℃ (图 1a)。



注: 图中阴影部分为误差范围 Note: The shaded area in the graph shows the margin of error

图 1 2021 年 5—10 月的气温 (a)、空气湿度 (b)、降水 (c)、土壤含水量 (d)、土壤温度 (e) 变化

Fig. 1 Variations of meteorological and soil factors during the study period of May-October of 2021. air temperature(a), relative air humidity (b), rainfall(c), volumetric soil water content(d), and soil temperature (e).

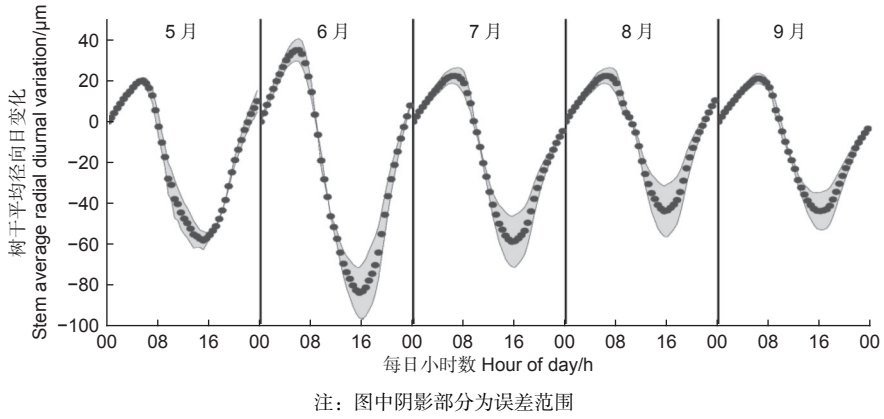
2021 年为极端丰水年, 年降水量 589.6 mm, 远高于多年均值 (378.9 mm), 降水集中在 6 月中—7 月中 (降水高峰期), 占全年降水量的 41%; 降水高峰期前 (5 月初—6 月中) 的降水占全年的 12%; 高峰期后 (7 月中—8 月末) 的降水占 30% (图 1c)。日空气湿度全年高于 25%, 最高达 90% (7 月中旬) (图 1b)。

土壤含水量在 5 月至 6 月初期间 (降水高峰期之前) 呈显著下降的趋势; 自 6 月中旬起, 由于降水增多, 土壤含水量明显恢复和升高 (图 1d)。土壤温度在 5 月 1 日达到 0 ℃ 以上, 随后持续上升, 在 7 月达到最高点之后开始缓慢下降, 8 月后

下降速度加快。在 5 月下旬、6 月初和 7 月中旬, 土壤温度均出现明显升高现象。土壤温度的变化范围为 0.56~18.4 ℃, 平均温度为 10.9 ℃ (图 1e)。

2.2 生长季内径向生长日动态特征

在 5—9 月的树木日径向变化曲线见图 2, 在 6:00—8:00 左右达到最大值, 之后随着太阳辐射增强和树干蒸腾失水增多而收缩, 表现为持续降低, 在 16:00 左右达到最小值, 之后随着树干吸水膨胀而持续升高。日动态的周期性在 5—9 月没有明显差别, 树木径向变化的极值出现时间较为一致, 但极值出现时间会随季节变化而逐渐后移, 即在秋季晚于夏季。其中 6 月份树干的日变幅较大, 7—



Note: The shaded area in the graph shows the margin of error

图 2 华北落叶松生长季内的径向生长日变化特征

Fig. 2 Daily pattern of stem radial changes of *Larix principis-rupprechtii* in the growing season.

9月份的变幅逐渐变小。每日的径向生长量为5月份较高,6月份最高,7—9月份较低且逐渐减小。

2.3 径向生长的季节动态特征

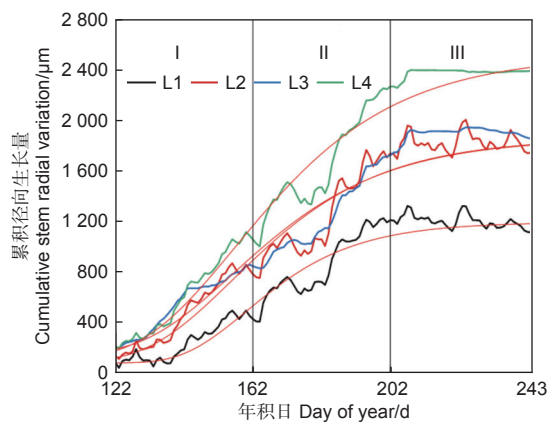
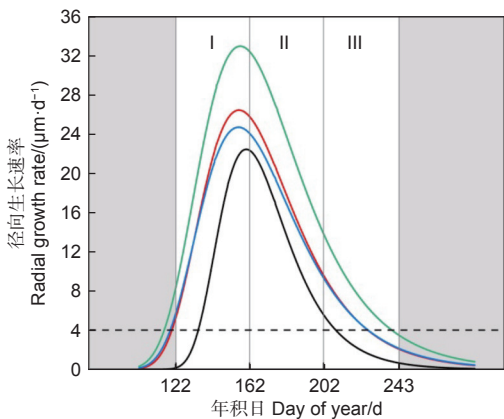
华北落叶松径向生长的开始时间为第 122 ± 7.04 d (5月2日左右),结束时间为第 224.75 ± 11.03 天 (8月12日左右),生长期长为 102 ± 17.84 d, 径向生长速率平均为 $10.07 \pm 2.84 \mu\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$; 最大平均生长速率为 $26.58 \pm 3.91 \mu\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, 出现在第 157.25 ± 1.64 d (6月7日左右)。

2.4 径向生长与环境因子的关系

以降水高峰期 为界, 将华北落叶松径向生长季节变化 (5—8月) 划分为 3 个阶段: (I) 降水高峰期前 (5月初—6月中), 该阶段平均径向生

长速率为 $15.59 \mu\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, 其累积径向生长量占全年生长总量的 45%; (II) 降水高峰期 (6月中—7月中), 该阶段平均径向生长速率为 $14.39 \mu\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, 累积生长量占全年生长总量的 36%; (III) 降水高峰期后 (7月中—8月末), 该阶段平均径向生长速率为 $4.84 \mu\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$, 累积径向生长量占全年生长总量的 5% (图 3)。

2.4.1 生长季内径向生长与环境因子的关系 整个生长季的树干径向生长量平均为 $1\,239.81 \pm 194.06 \mu\text{m}$ 。径向生长量与土壤温度、空气湿度、空气温度、土壤含水量呈显著相关 (相关系数 R 分别为 0.95、0.82、0.59、0.23), 而与降水量相关性较弱 (R 为 0.21, 表 2)。



注: (a) 径向生长速率; (b) 累积径向生长。I、II、III 分别为降水的高峰期前、高峰期、高峰期后。本文以第 122 天 (5月2日) 至第 243 天 (8月31日) 为主要生长季。

Notes: (a) radial growth rate; (b) accumulated radial growth. I, II, III indicate the periods before, during, and after the peak rainfall time, respectively. In this article, the main growing season is from day 122 (May 2) to day 243 (August 31).

图 3 华北落叶松不同生长阶段的径向变化特征。

Fig. 3 Radial variation characteristics of *Larix principis-rupprechtii* in different growth periods.

表2 华北落叶松生长季树干径向生长量与环境因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between environmental factors and the stem radial growth of *Larix principis-rupprechtii* during the early and middle growing season (May - August)

空气温度 Ta	空气湿度 RH	降水量 P	土壤含水量 Ws	土壤温度 Ts
0.59**	0.82**	0.21*	0.23**	0.95**

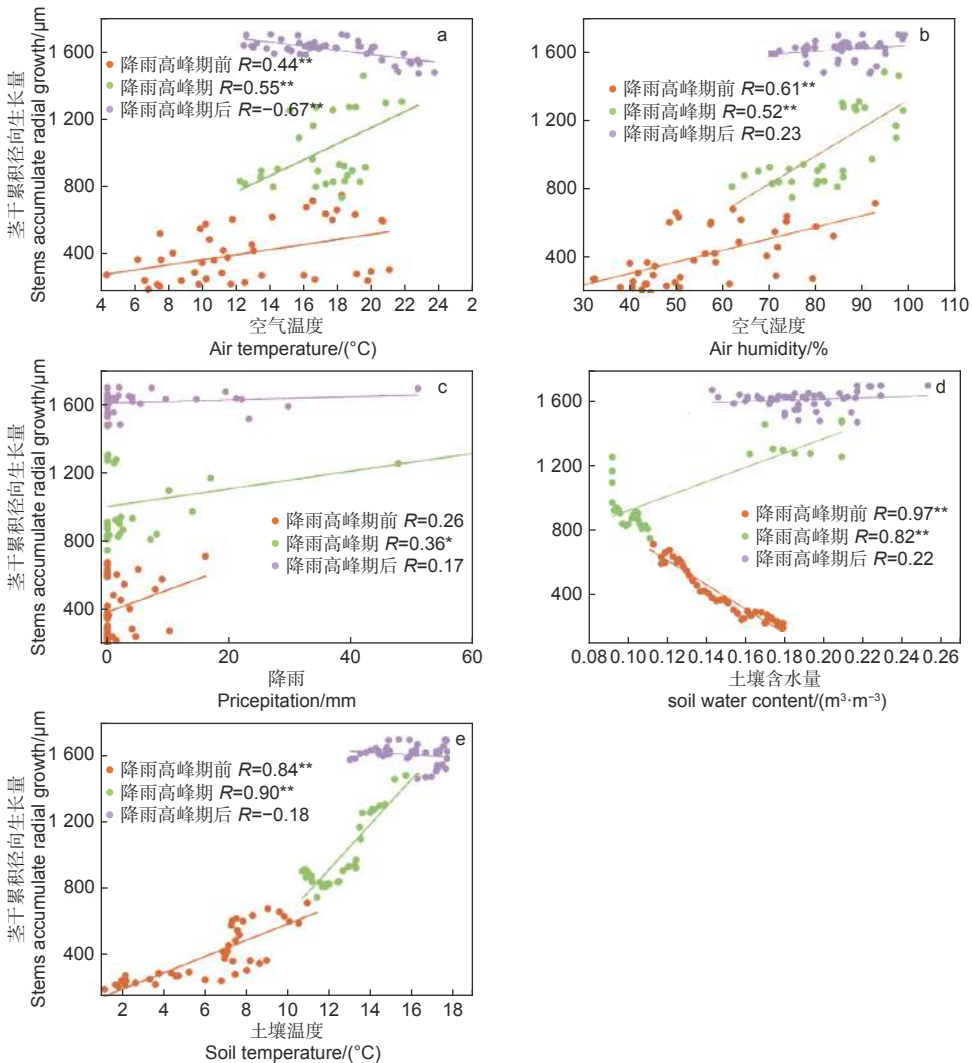
注/Notes: **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$

2.4.2 不同生长阶段树木径向生长与环境因子的关系 在降水高峰期前(5月初—6月中), 径向生长与土壤温度($R=0.84$)、空气湿度($R=0.63$)、

空气温度($R=0.44$)呈显著正相关($P < 0.01$), 而与土壤含水量呈显著负相关($R=-0.97$, $P < 0.01$), 与降水量相关性不显著($R=0.26$) (图4a-e)。

在降水高峰期内(6月中—7月中), 径向生长与土壤温度($R=0.90$)、土壤含水量($R=0.82$)、空气温度($R=0.55$)、空气湿度($R=0.52$)呈显著正相关($P < 0.01$)。与降水高峰期前相比, 该阶段土壤含水量与生长的关系由显著负相关转变为显著正相关。与降水量的相关性低于其他环境因子($R=0.36$, $P < 0.05$, 图4c)。

在降水高峰期后(7月中—8月末), 径向生长与空气温度($R=-0.67$, $P < 0.01$)、土壤温度



注/Notes: **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$

图4 不同生长阶段华北落叶松树木径向生长量与环境因子空气温度(a)、空气湿度(b)、降雨量(c)、土壤含水量(d)、土壤温度(e))的关系

Fig. 4 The relationships between radial increments of *Larix principis-rupprechtii* and environmental factors in different growth periods. (a) air temperature; (b) relative air humidity; (c) rainfall; (d) soil water content; (e) soil temperature.

($R=-0.18$)呈负相关,与土壤含水量、空气湿度和降水量呈正相关但不显著(图4)。

3 讨论

3.1 华北落叶松树干径向日变化特征

华北落叶松树干径向日变化表现为白天收缩-晚上膨胀的变化模式。该结果与河北塞罕坝樟子松^[13]、宁夏六盘山华北落叶松^[17]、祁连山云杉^[18]的研究结果一致。引起树干径向日变化的因素,除了真正的生长以外,主要是由蒸腾失水和吸收补水决定的树体水量平衡^[19]。随着太阳升起,气温升高,树木蒸腾增强,由于根系吸水供应不上,树体失水逐渐增多,出现树干收缩;当太阳辐射降低或进入夜晚以后,蒸腾逐渐减小或停止,根系吸水逐渐补充树体失水,使树干膨胀^[20]。

有研究表明树干径向日变化的振幅随温度下降和光照时间缩短而减弱^[21]。在5—6月,华北落叶松的树干收缩与膨胀现象比7—9月更明显,且夜间膨胀量比日间收缩量高出更多(图2)。从降水的不同时期来看,在降水高峰期前(5月初—6月中),树干收缩膨胀现象明显,日间收缩量小于夜间膨胀量,平均日径向生长量最大^[22]。在降水高峰期内(6月中—7月中),由于降雨频繁和雨量较大,导致土壤含水量和空气湿度较高,树干日间收缩减小^[23],同时树干膨胀幅度也减小,平均日径向生长量较小。在降水高峰期后(7月中—8月末),尽管土壤含水量较高,但由于空气和土壤温度降低,生长已进入末期,所以树干径向收缩和膨胀幅度及日生长量均大幅减小。

3.2 降水高峰期前后的径向生长量变化

前人研究表明,降水是我国北方干旱半干旱区甚至半湿润区内树干径向生长的主要限制因子^[9]。生长季早期降水可以补充土壤水分,水分不仅可以促进光合产物的积累,也会促进形成层细胞的分裂和伸长^[24],对早材形成起主导作用。高佳妮等人^[25]研究贺兰山油松时发现,生长季早期降水为树木生长提供了宝贵水源,保证树木正常生长,而生长季中期的降雨则决定了树木的最大生长速率。在本文研究区内,降雨高峰期前的降水仅占当年降水的12%,此时径向生长已完成45%以上,且径向生长始终与土壤含水量及土壤温度的关系更密切,说明当年降水并非研究区内华北落叶松径向生长的主要水分来源。来自更长期的观测结果表明,当生长

前期的降水相对较少时,祁连山青杆在生长季早期的生长量也会相应减少^[26]。在本研究中的降水高峰期内,此时的降水占到当年降水的41%,该阶段的集中降雨充分补充了土壤水分,使其快速上升。同时,该阶段的径向生长量占全年总生长量的36%,略低于降水高峰期前的生长量贡献比例。有研究表明,生长季内过多降水会导致光合作用所需的热量和光照不足,从而影响径向生长量^[27]。在降水高峰期后,径向生长量贡献比例仅为0.05%,但降雨量占全年的比例为30%,此时因为气温低,形成层生长缓慢或趋于停止^[28],降雨对径向生长的作用较弱。

3.3 不同生长阶段的径向生长与环境因子的关系

本研究表明,在整个生长季尺度,华北落叶松的径向生长始终受到温度的显著影响,而对水分变化并不敏感。但在不同生长阶段,水分(尤其土壤含水量)对径向生长的影响有明显差异。

在降水高峰期前,径向生长与土壤温度呈显著正相关,但与土壤含水量呈显著负相关。温度是树干形成层活动开始的重要影响因子,温度可改变木质部分化特征,提高细胞分化率^[29],进而决定径向生长的开始时间^[30]。此外,春季温度升高导致冬季积雪和冻土融化,刺激树木根系恢复活力以吸收土壤养分和水分,因而改善土壤水分会促进生长^[31]。以往在干旱区和半湿润区的研究表明,降水是生长季初期树木径向生长的重要影响因子。但在本研究中,生长季初期的降水与径向生长的相关性不显著,在本研究年份(2021年)内的降水高峰期之前共有19次降雨事件,但降水量超过10 mm的单次降雨仅2场,因此土壤水分并未得到降水的有效补充。同时观察到了土壤水分快速下降与径向快速生长是同步发生的,使得二者存在显著负相关,这表明生长季初期的土壤水存量(可能来自冬季积雪融化所产生的水分^[32])是影响径向生长的重要因子。随着土壤水分不断下降,如果不能被降水及时补充(如降水延迟或降水量小),则可能发生春季的土壤干旱,初夏的降雨延迟或降雨模式的改变,进而限制树木生长。

在降水高峰期内,径向生长首先与土壤温度和土壤含水量极显著正相关。该地区2021年7月的降水量占全年的40%,频繁的降水使土壤水分快速补充,充足的土壤水分提升了树木形成层细胞分裂和伸长的能力^[33]。土壤温度升高也利于植物体内

的非结构性糖转化为糖类,为细胞生长提供能量基础^[34]。同时该时期树木新叶快速生长,产生大量生长激素,也会转移至树干并促进树干形成层的细胞分裂和生长^[35]。在这一阶段,树木径向生长速率达到较高值,因为合理的水热组合可有效促进树木径向生长。而这一阶段的径向生长量仅占全年的36%,因此本研究认为即使是极端丰水年份有较多降雨,对径向生长的提升也是有限的。

在降雨高峰期后,尽管此时降水量占全年的30%左右,但树木累积径向生长量已达全年生长量的95%以上,表现为与空气温度、土壤温度呈负相关,与土壤含水量、空气湿度、降水呈弱的正相关。这是因为在8月初之后,随着空气、土壤温度逐渐降低,树干形成层细胞生长变缓^[33],前期的新生细胞的分裂和生长基本完成,细胞壁木质化过程完成^[36-37],所以径向生长逐渐趋于停止。

4 结论

本研究在地处半干旱区的内蒙古罕山保护区内,对华北落叶松树干径向生长及环境因子进行了同步的高分辨率连续监测。研究表明,在生长季降水高峰期前(5月初—6月中),树干累积径向生长量占全年生长量的45%以上,且受同期降水量的直接影响较小;在降水高峰期内(6月中—7月中),树干累积径向生长量占全年生长量的36%左右,同时受土壤温度和土壤含水量的影响更大,说明即使在研究年份为极端丰水年的情况下,降水量增多对同期径向生长的促进作用仍有限。

参考文献:

- [1] CAMAREAO J J, GAZOL A, SANGUESA B G, et al. Coupled climate-forest growth shifts in the Chilean Patagonia are decoupled from trends in water-use efficiency[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 222-231.
- [2] SONG L, ZHU J, ZHANG J, et al. Divergent growth responses to warming and drying climates between native and non-native tree species in Northeast China[J]. *Trees*, 2019, 33(4): 1143-1155.
- [3] IPCC. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.
- [4] 曾楠. 大兴安岭南段阔叶林乔木死亡动态与生态系统响应[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017.
- [5] 赵鹏武, 管立娟, 刘兵兵, 等. 我国半干旱区东段森林动态研究现状及展望[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(2): 74-79.
- [6] 路明. 祁连山东部不同针叶树种径向生长监测研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016.
- [7] 勾晓华, 邵雪梅, 王亚军, 等. 祁连山东部地区树木年轮年表的建立[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 364-367.
- [8] 牛豪阁, 张芬, 于爱灵, 等. 祁连山东部青杆年内径向生长动态对气候的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7412-7420.
- [9] LIU Z B, WANG Y H, TIAN A, et al. Intra-Annual Variation of Stem Radius of *Larix principis-rupprechtii* and Its Response to Environmental Factors in Liupan Mountains of Northwest China[J]. *Forests*, 2017, 8(10): 382.
- [10] 董满宇, 江源, 王明昌, 等. 芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(23): 7430-7439.
- [11] 管伟, 雄伟, 王彦辉, 等. 六盘山北侧华北落叶松树干直径生长变化及其对环境因子的响应[J]. *林业科学*, 2007, 43: 1-6.
- [12] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山南坡华北落叶松树干直径生长及其对气象因子的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27: 432-441.
- [13] 季倩雯, 郑成洋, 张磊, 等. 河北塞罕坝樟子松径向生长动态变化及其与气象因子的关系[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(3): 257-265.
- [14] BOURIAUD O, LEBAN J M, BERT D, et al. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce[J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(6): 1271-1277.
- [15] 张军周. 祁连山树木形成层活动及年内径向生长动态监测研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [16] DUCHESNE L, HOULE D, D'ORANGEVILLE L. Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec Canada[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162-163: 108-114.
- [17] 王亚蕊, 刘泽彬, 王彦辉, 等. 六盘山半湿润区华北落叶松树干半径变化特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3313-3321.
- [18] WANG W B, ZHANG F, YUAN L M, et al. Environmental factors effect on stem radial variations of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains, Northwestern China[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 210-228.
- [19] LIU, X S, NIE Y Q, WEN F. Seasonal dynamics of stem radial increment of *Pinus taiwanensis* Hayata and its response to environmental factors in the Lushan mountains, Southeastern China[J]. *Forests*, 2018, 9(7): 387.
- [20] 刘士玲, 杨保国, 姚建峰, 等. 广西红椎树干径向生长研究[J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41(5): 82-90.
- [21] KING G, FONTI P, NIEVERGELT D, et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168: 36-46.
- [22] ZWEIFEL R, STERCK F, BRAUN S, et al. Why trees grow at

- night[J]. *New Phytologist*, 2021, 231(6): 2174-2185.
- [23] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 等. 雷州半岛尾巨桉旱季径向生长特征及其影响因素分析[J]. *林业科学*, 2019, 55(8): 45-53.
- [24] ZWEIFEL R, HAENI M, BUCHMANN N, *et al.* Are trees able to grow in periods of stem shrinkage?[J]. *New Phytologist*, 2016, 211(3): 839-849.
- [25] 高佳妮, 杨保, 秦春. 树木年内径向生长对干旱事件的响应——以贺兰山油松为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3505-3511.
- [26] 夏敬清, 勾晓华, 王玲玲, 等. 祁连山西部青海云杉径向生长对气候因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3585-3593.
- [27] ZHANG W, JIANG Y, DONG M, *et al.* Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 140-142.
- [28] DESLAURIERS A, ROSSI S, ANFODILLO T. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred?[J]. *Dendrochronologia*, 2007, b,25(2): 113-124.
- [29] MA J, GUO J B, WANG Y H, *et al.* Variations in stem radii of *Larix principis-rupprechtii* to environmental factors at two slope locations in the Liupan Mountains, northwest China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(2): 513-527.
- [30] JING Y, ZHANG Y P, GUO Y Y, *et al.* Intra-Annual xylem growth of *Larix principis-rupprechtii* at its upper and lower distribution limits on the Luyashan Mountain in north-central China[J]. *Forests*, 2015, 6(12): 3809-3827.
- [31] 石建周, 刘贤德, 田青, 等. 祁连山中部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 261-267.
- [32] 杨蕾, 秦莉, 刘可祥, 等. 新疆伊犁南部山区树木径向生长对积雪变化的响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2022, 16(1): 78-86.
- [33] 吴秀臣, 裴婷婷, 李小雁, 等. 树木生长对气候变化的响应研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(1): 109-116.
- [34] DESLAURIERS A, HUANG J G, BALDUCCI L, *et al.* The contribution of carbon and water in modulating wood formation in black spruce saplings[J]. *Plant Physiology*, 2016, 170(4): 2072-2084.
- [35] LJUNG K, BHALERAO R P, SANDBERG G. Sites and homeostatic control of auxin biosynthesis in *Arabidopsis* during vegetative growth[J]. *The Plant Journal*, 2001, 28(4): 465-474.
- [36] STEPPE K, STERCK F, DESLAURIERS A. Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology[J]. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(6): 335-343.
- [37] ROSSI S, DESLAURIERS A, ANFODILLO T, *et al.* Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length[J]. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 301-310.

Radial Growth in Response to Hydrothermal Environment of *Larix principis-rupprechtii* in Hanshan, Inner Mongolia

CHEN Jia-jia¹, ZHOU Mei¹, ZHAO Peng-wu¹, XU Chong-yang², SHI Liang²,
BAO hu³, LIU Yan-jun⁴, CAO Guang-ming⁴

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Surface Process Analysis and Simulation, Ministry of Education, School of Urban and Environment, Peking University, Peking 100872, China; 3. Tongliao Academy of Forestry Sciences, National Forest Ecosystem Positioning Research Station in Tejinhanshan, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China; 4. Hanshan Forest Farm, Zalute Banner, Tongliao 029100, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] :In the semi-arid regions of northern China, due to the long-time seasonal drought deficit, trees growth is sensitive to climate change. With rapid warming and associated increasing evapotranspiration in recent decades, the growth of trees in the semi-arid regions is gradually restricted by climate drying. Therefore, it is important to understand the pattern of trees growth and its response to environment for better management. This study aims to systematically analyze the radial growth of larch (*Larix principis-rupprechtii*) in semi-arid regions of China and its relationship with environment factors (temperature, precipitation and so on), to provide a theoretical support for understanding response of trees growth to environment change in semi-arid regions of northern China. [Methods] :The radial growth of four sample trees of *Larix principis-rupprechtii* was continuously measured with high resolution using point dendrometer systems in the Hanshan National Nature Reserve, Zalut Banner, Tongliao City. Environment factors including temperature, rainfall, soil water content and so on were measured for analyzing the relationship between radial growth and environmental factors. [Results] :The radial growth of larch contracted during the day and expanded at night. From May to June, the contraction and expansion of larch stems were much higher than those from July to September; Radial growth of larch (*Larix principis-rupprechtii*) was significantly influenced by soil temperature throughout the growing season scale, but soil moisture content was an important factor affecting radial growth at different growing stages. In the year 2021 with extreme rainfall, radial growth of larch before the rainfall peak accounted for 45% of the total annual growth, indicating that soil temperature and water content are important factors affecting radial growth of larch. Precipitation in summer contributed less to trees growth, while soil moisture supply after winter snow-cover melting in spring was a key factor in determining radial growth. [Conclusions] : In the semi-arid region of Inner Mongolia, our results suggested that precipitation has little contribution to radial growth of larch, but indirectly affects radial growth through soil moisture. Soil temperature and soil moisture are important factors affecting radial growth. At the beginning of the growing season, when soil moisture is not effectively supplemented by rainfall, radial growth mainly depends on the limited water reserved in the soil.

Keywords: Semi-arid areas in northern China; *Larix principis-rupprechtii*; radial growth; Changes in environmental factors

(责任编辑: 崔 贝)