北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系

孟盛旺 刘利平 刘文军 萨格萨 牛乌日娜 王慧杰 斯庆毕力格

Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China

Meng Shengwang, Liu Liping, Liu Wenjun, Sagesa, Niuwurina, Wang Huijie, Siqingbilige

引用本文:
孟盛旺, 刘利平, 刘文军, 萨格萨, 牛乌日娜, 王慧杰, 斯庆毕力格. 毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6):10–18. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240398
Meng Shengwang, Liu Liping, Liu Wenjun, Sagesa, Niuwurina, Wang Huijie, Siqingbilige. Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6):10–18. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240398

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240398

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沙地天然樟子松径向生长对干旱的响应

Climatological response of radial growth for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to drought in Hulun Buir Sandland, Inner Mongolia of northern China

北京林业大学学报, 2018, 40(7): 27–35. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170467

秦岭不同年龄太白红杉径向生长对气候因子的响应

Age–dependent radial growth responses of *Larix chinensis* to climatic factors in Qinling Mountains, northwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(9): 58–65. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170161

毛乌素沙地油蒿光合电子传递速率生长季动态及其对环境因子的响应

Temporal dynamics in photosynthetic electron transfer rate of *Artemisia ordosica* in growing season and its response to environmental factors in Mu Us Sandy Land of northwestern China

北京林业大学学报, 2021, 43(2): 54–62. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200154

将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应

Response of *Pinus massoniana* tree–ring width in the Jiangle Area of Fujian Province to climate change

北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30–39. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190067

普达措国家公园海拔上限3个针叶树种径向生长对气候变化的响应

Response of radial growth of three conifer trees to climate change at their upper distribution limits in Potatso National Park, Shangri–La, southwestern China

北京林业大学学报, 2017, 39(1): 43–51. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160184

庐山日本柳杉径向生长对气候响应的边际效应

Marginal effect of radial growth of *Cryptomeria japonica* to climate in Lushan Mountain of southwestern China

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 63–69. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200372

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240398

毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系

孟盛旺[1] 刘利平[2] 刘文军[3] 萨格萨[2] 牛乌日娜[2] 王慧杰[2] 斯庆毕力格[2]
（1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室千烟洲试验站，北京 100101；2. 鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心，内蒙古 鄂尔多斯 017010；3. 鄂尔多斯市造林总场，内蒙古 鄂尔多斯 014300）

摘要:【目的】樟子松是我国北方干旱、半干旱地区沙地治理的重要树种，明晰其径向生长变化特征及其与气候因子的关联性，旨在为水分胁迫较高的毛乌素沙地植被恢复和樟子松人工林经营管理提供理论基础。**【方法】**通过径向生长记录仪连续 15 个月监测毛乌素沙地樟子松树干，分析其径向生长变化的昼夜动态和季节动态规律，采用线性混合效应模型和 Spearman 相关分析研究径向生长过程与气候因子之间的关联性。**【结果】**(1)樟子松在暖热季节表现为白天收缩、夜间膨胀的昼夜径向生长变化模式；寒冷季节则相反，且在 12 月和 1 月昼夜径向生长变化波动更为剧烈。(2)樟子松径向生长于 4 月中下旬开始萌动，5—8 月期间基本完成当年生长，进入 9 月后，径向生长停滞并逐渐收缩。(3)在整个生长时期内，樟子松日径向生长速率与相对湿度、降水量和气温呈显著正相关，而与光合有效辐射呈显著负相关；但针对不同时期，光合有效辐射对日径向生长速率的影响均不显著；水分亏缺量和气候因子之间的相关性大多与日径向生长速率相反。**【结论】**毛乌素沙地樟子松的季节径向生长特征主要受温度和水分条件的驱动。研究结果有助于深入认识樟子松的年内径向生长过程及其气候影响规律，为气候变化背景下毛乌素沙地的植被恢复和樟子松人工林的可持续经营提供科学参考。

关键词：樟子松；径向生长；昼夜变化；日生长速率；水分亏缺量；气候因子
中图分类号：S791.253 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)06−0010−09
引文格式：孟盛旺，刘利平，刘文军，等. 毛乌素沙地樟子松径向生长动态及其与气候因子的关系［J］. 北京林业大学学报，2025，47(6)：10−18. Meng Shengwang, Liu Liping, Liu Wenjun, et al. Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 10−18.

Radial growth dynamics of Mongolian pine and its relationship with climatic factors in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China

Meng Shengwang[1] Liu Liping[2] Liu Wenjun[3] Sagesa[2] Niuwurina[2] Wang Huijie[2] Siqingbilige[2]
(1. Qianyanzhou Ecological Research Station, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Ordos Forestry and Grassland Development Center, Ordos 017010, Inner Mongolia, China;
3. Ordos Forest Farm, Ordos 014300, Inner Mongolia, China)

Abstract: [**Objective**] Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) is an essential tree species for sandy land management in dry and semi-arid regions of northern China. Clarifying the characteristics of intra-annual radial variations in Mongolian pine and their relationship with climatic factors can provide a

收稿日期: 2024−11−25 **修回日期:** 2025−01−16
基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFA0608102)，鄂尔多斯市博士科研资助项目。

第一作者: 孟盛旺，副研究员。主要研究方向：森林经营与生长模型。Email：mengsw@igsnrr.ac.cn 地址：100101 北京市朝阳区大屯路甲 11 号中国科学院地理科学与资源研究所。
责任作者: 斯庆毕力格，正高级工程师。主要研究方向：森林经营与生长模型。Email：siqingbilige@bjfu.edu.cn 地址：017000 内蒙古自治区鄂尔多斯市康巴什区鄂尔多斯大街鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

theoretical basis for vegetation restoration and plantation management in the Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia of northern China, where water stress is significant. [**Method**] In this study, stem radial size changes in Mongolian pine in the Mu Us Sandy Land were continuously monitored for 15 months using automated dendrometers, and the diurnal and seasonal dynamics of radial changes were studied. The relationship between radial growth process and climate factors was investigated using a linear mixed effect model and Spearman correlation analysis. [**Result**] (1) In warm seasons, Mongolian pine's diurnal stem radial variation pattern showed contraction during the day and expansion during the night; in cold seasons, the opposite was true, with more noticeable daily radial fluctuations in December and January. (2) Stem radial growth began in mid-to-late April, with annual growth finished primarily between May and August. After September, radial growth slowed and eventually contracted. (3) During the entire growing period, daily radial growth rate of Mongolian pine had a significant positive association with relative humidity, precipitation and temperature, but a significant negative correlation with photosynthetically active radiation. However, for different periods, photosynthetically active radiation did not have a significant impact on daily radial growth rate. The relationship between tree water deficit and climatic factors was mostly opposite to daily radial growth rate. [**Conclusion**] The seasonal growth features of Mongolian pine in the Mu Us Sandy Land are predominantly driven by temperature and moisture conditions. The findings contribute to a better knowledge of Mongolian pine growth and climatic influence patterns, and provide scientific reference for vegetation restoration and sustainable management of Mongolian pine plantations in the Mu Us Sandy Land under the background of climate changes.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; radial growth; diurnal variation; daily growth rate; water deficit; climatic factor

树木径向生长是其生长特性的重要表现形式，对气候因子的变化具有较高的敏感性[1]。深入研究树木径向生长动态及其对不同时间尺度气候因子的响应特征，对于理解气候变化背景下森林动态变化规律，以及制定适应气候变化的森林管理措施具有重要意义[2−3]。目前，已有研究[4−5]通过分析树轮参数与气候资料之间的相关性，在年尺度上探讨了树干生长对气候条件的响应特征。然而，由于形成层扩大和木质部生长在较短时间内完成，且易受外部环境的强烈影响，仅以年度树轮宽度为基础的研究难以揭示年内气候因素对树木径向生长影响的潜在机制[6−7]。

连续监测树木径向变化对于理解树木对气候因子短期变化的响应至关重要[8]。高分辨率径向生长记录仪能够从小时尺度到年尺度完整且高频地监测径向变化，为解析树木年内径向生长过程及其气候驱动因素（温度、湿度和蒸汽压差等）提供详细信息[9]。然而，径向生长仪不仅记录了因树干形成层细胞分裂和扩大导致的不可逆膨胀，还记录了由树干水分消耗和补充引起的可逆变化[10]。多项研究[11−12]表明，生长季树干直径呈白天收缩、夜间膨胀的昼夜变化规律，这反映了树木体内水分吸收和消耗的波动特征。由于树木生长和水分变化之间存在紧密的耦合关系，准确区分二者成为科学难题[3]。为此，有学者提出零增长模型来提取树木的生长信息和可逆收缩，并指出可用茎干收缩量来表征树木水分缺失[13]。研究[14−15]表明，零增长模型能够有效分离茎干生长和水分变化，并得到了广泛认可与应用。

基于径向生长仪的研究发现，不同树种的径向生长物候期存在显著差异[16]，针叶树的生长季开始和结束时间均晚于落叶阔叶树[9]。但也有研究[14]表明，同一群落不同物种的年内生长模式表现出很强的趋同性，仅生长速率存在差异。同一树种的年内生长过程对气候条件的变化非常敏感。例如，随着海拔升高，青海云杉（*Picea crassifolia*）的生长启动时间显著推迟，且在东坡的生长季开始时间早于西坡，结束时间晚于西坡[17]。温度和水分是影响树木径向生长的关键因素，特别是春季温度，对温带树木生长季的启动起决定性作用[18]。水分对树木径向生长的影响则主要通过降水和饱和水汽压差来调节。研究[10,19]表明，降水始终是促进树木径向生长的主要因子，而较低的饱和水汽压差有利于树木径向生长。此外，不同树种的单峰或双峰生长模式也是由于其径向生长对饱和水汽压差的敏感性不同所致[20]。这些研究表明，树干径向变化模式和机制可随物种、气候条件的不同而改变，这可能反映了不同物种的遗传特性和对环境异质性的差异化响应[21−22]。随着气候变化的日益加剧，深入探索树木径向生长与气

候因素之间的耦联关系至关重要。

毛乌素沙地位于我国北方农牧交错带中部，属于黄土高原向鄂尔多斯高原的过渡地带，生态环境较为脆弱，植被恢复对于该区域的生态修复尤为重要。樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)因其极强的耐低温和耐干旱能力，成为当地重要的固沙造林树种，在防风固沙、改善生态环境等方面发挥了显著作用。然而，目前关于毛乌素沙地樟子松的年内径向变化特征及其对气候因子的响应规律仍不明晰，这在一定程度上制约了当地樟子松人工林生产力的提升以及适应气候变化的森林管理措施的制定。因此，本研究拟利用高精度径向生长仪，对毛乌素沙地樟子松的径向生长过程进行连续监测，分析其树干径向生长的昼夜变化规律和季节性动态，并探讨樟子松径向变化与气候因子之间的关联性。研究结果将有助于揭示樟子松在干旱胁迫环境下的生长机制，为毛乌素沙地的植被恢复和樟子松人工林的经营管理提供重要的理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯高原东南部毛乌素沙地东北缘(39°24′07″N，109°47′07″E)，海拔 1 400 m。该区属于温带大陆性季风气候区，年平均降水量为 250～440 mm，主要集中在 7—9 月，年平均温度为 6.0～8.5 ℃，最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均温度分别为−9.5～12.0 ℃ 和 22.0～24.0 ℃。毛乌素沙地为典型的风沙地貌，以固定、半固定和流动沙丘为主，土壤类型主要为风沙土。由于沙丘广泛分布，研究区植被类型以沙地植物为主，包括油蒿(*Artemisia ordosica*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、沙地柏(*Juniperus sabina*)、乌柳(*Salix cheilophila*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)和芦苇(*Phragmites australis*)等。近年来，毛乌素沙地营造了大量的人工林，主要包括樟子松、小叶杨(*Populus simonii*)等树种。

1.2 研究方法

1.2.1 样树选择与数据采集

2022 年 4 月在樟子松人工林样地内选择 4 株生长健康、干形直立、生长特征相近的树木，平均胸径为(9.3 ± 1.6) cm，在其胸径处安装高精度径向生长记录仪(DC3，Ecomatik，德国，精度为 3 μm)，监测树木周长的变化。为减少树皮水分变化引起的膨胀和收缩对径向生长仪传感器压力的影响，在安装过程中去除部分外皮。安装后，将传感器的数据采集时间间隔设置为 30 min。数据采集时间范围为 2022 年 4 月—2023 年 6 月。由于传感器记录的是树干周长的变化，本研究假设树干横断面为正圆形，将周长数据转换为半径，以树干半径的变化来表征径向生长变化，从而形成树干径向变化曲线。

本研究使用的气象数据来源于中国科学院内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站(39°29′37″N，110°11′29″E)，该研究站距离监测样点 36 km。选取的气候因子包括日平均气温(T_m，℃)、日最低气温(T_{min}，℃)、日最高气温(T_{max}，℃)、降水量(P，mm)、相对湿度(H_R，%)、光合有效辐射(R_{PA}，mol/(m^2·s))和 10 cm 深处土壤温度(T_S，℃)。除光合有效辐射外，其他气象数据均为逐小时记录，本研究提取日尺度统计值进行分析。此外，根据日平均气温和相对湿度计算饱和水汽压差(VPD，kPa)[23]。

$$\mathrm{VPD} = 0.610\,8(1 - H_R)\exp(17.27T_m/(T_m + 273.3)) \quad (1)$$

1.2.2 径向生长变化特征分析

为了研究樟子松径向生长的昼夜变化特征，计算每天各时间点的半径观测值与当天起始观测值的差值，生成形似正弦函数的昼夜径向变化曲线[11]，曲线上升表现为树干膨胀，曲线下降表现为树干收缩。在此基础上，按月对每个时间点的差值进行平均处理，得到各月份的昼夜径向变化特征。

基于连续的径向累积变化曲线，根据零增长模型[13]来定义不可逆生长。零增长模型假设当茎干收缩时，生长便完全停止。据此，将茎干生长诱导的不可逆膨胀和水分亏缺引起的可逆收缩分开。当径向变化曲线中当前茎干半径值大于之前最高值时，其差值定义为茎干径向生长量(GRO)，为不可逆膨胀状态，当当前茎干半径值小于之前最高值时，其差值定义为水分亏缺量(tree water deficit，TWD)，即因缺水引起的茎干收缩量。TWD 越大，水分亏缺程度越严重。

一日之中茎干径向生长量的累加总和即为当日的径向生长量，即日径向生长速率(R_{GRO}，μm/d)，一段时间内日径向生长速率的累加，为该时间段的累积径向生长量，全年日径向生长速率的和即为年径向生长量。水分亏缺量的最低值，即当日茎干半径达到最大值时对应的水分亏缺量，定义为该日的树木水分亏缺量，这一指标可反映树木冠层水分状况[24]，用于后续分析树木水分亏缺状况与气候因子的关联性。

1.2.3 径向生长与气候因子的关联性分析

采用线性混合效应模型(LME，lme4 包)分析生长季气候因子对日径向生长速率和水分亏缺量的影响，建立日径向生长速率或水分亏缺量与气候因子

的关系，去除方差膨胀因子 > 5 的变量后，建立如下混合效应模型。

$$Y=\alpha+\beta_1 T_{\min}+\beta_2 T_{\max}+\beta_3 P+\beta_4 H_{\mathrm{R}}+\beta_5 R_{\mathrm{PA}}+a+b+\varepsilon \tag{2}$$

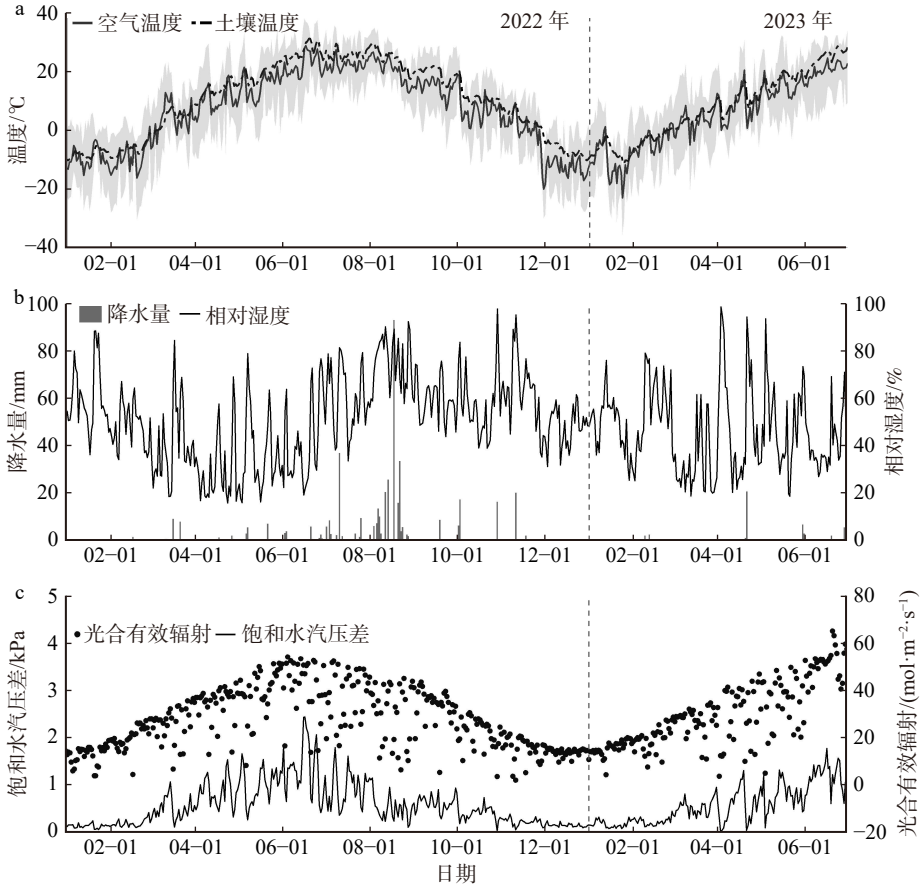
式中：Y 为响应变量（日径向生长速率或水分亏缺量），$T_{\min}$、$T_{\max}$、P、H_{R} 和 R_{PA} 分别为固定效应变量，α 为截距，$\beta_1 \sim \beta_5$ 为斜率，a 和 b 为随机效应变量，分别指月份和样木个体，ε 为误差项。

为深入探究日径向生长速率和水分亏缺量与气候因子的关系，对日径向生长速率和水分亏缺量与各气候因子分别进行 Spearman 相关分析，考虑到 2023 年生长季数据仅涵盖 4—6 月，为了便于同期比较，将 2022 年数据划分为 4—6 月和 7—8 月两段。不同树木个体的径向变化曲线虽然相似，但其生长趋势存在差异，这导致不同个体的茎干生长和水分亏缺过程出现时间不同。若直接计算这些个体茎干生长和水分亏缺的平均值，可能会使茎干生长和水分亏缺这两个过程同时出现，从而违背零增长模型的假设。因此，在进行相关分析之前，首先采用离差标准化（0 ~ 1 标准化）方法对样木的径向累积变化曲线进行标准化处理，以去除个体生长趋势的影响。随后，计算 4 株样木标准化后的径向变化曲线的平均值，再依据零增长模型计算日径向生长速率和水分亏缺量。采用 R 4.2.1 软件（R core team，2022）进行数据统计分析和作图。

2　结果与分析

2.1　气候因子动态分析

2023 年上半年温度变化与 2022 年同期总体相似，但 2023 年 1 月的日平均气温波动较 2022 年同期更为剧烈，2 月温度整体高于 2022 年同期，特别是 2 月下旬的平均气温比 2022 年同期高 7 ℃（图 1a）。研究区 2022 年平均气温为 7.0 ℃，观测期内最热月（7 月）和最冷月（12 月）的平均气温分别为 22.1 ℃ 和−12.5 ℃（图 1a）。土壤温度以较低的日振幅随气温的变化而波动，最高值和最低值分别为 30.7 ℃ 和−11.3 ℃（图 1a）。2022 年全年降水量为 452.8 mm，主要集中在 7—8 月，其中 8 月降水量高达 244.6 mm，占全年降水量的一半以上；2023 年上半年降水量为 46.2 mm，较 2022 年同期减少 15 mm（图 1b）。相对湿度全年变化范围为 15% ~ 99%，其



温度曲线图中的灰色阴影为对应时期的空气温度最高值和最低值。

图 1　研究区气候因子的季节动态变化

Fig. 1　Seasonal dynamic variations of climatic factors in the study site

中 3—4 月较低，而 8 月较高(图 1b)。饱和水汽压差的变化范围为 0 ~ 2.5 kPa，春夏季节较高，秋冬季节较低；光合有效辐射呈近似钟形分布，夏季较高，冬季较低(图 1c)。

2.2 昼夜径向变化特征

樟子松昼夜径向变化特征表现出明显的季节特性(图 2)。寒冷的 12 月和 1 月的昼夜径向生长变化幅度最大，超过 100 μm，其他月份则相对较低。树干昼夜径向变化在暖热季节(2022 年 5—10 月、2023 年 4—6 月)表现为夜间膨胀日间收缩的趋势，而在寒冷季节(2022 年 11 月至次年 3 月)呈相反趋势。

2.3 径向变化季节动态

4 棵样木的累积径向生长量和水分亏缺量曲线相似，表明 4 棵样木樟子松的生长过程相似(图 3)。2022 年，径向生长约在 4 月中下旬启动，树干开始缓慢增粗，4—6 月期间，累积生长量均相对较低。5—8 月，樟子松进入快速生长阶段，累积径向生长量增加，7 月份累积量最大；日径向生长速率最高可达 100 μm/d(图 3、图 4)。9 月到次年 4 月初，樟子松树干不再增粗，生长趋于停滞，水分亏缺量逐渐上升，树干出现明显的收缩，到次年 1 月，水分亏缺量最高可达 1.1 mm 以上。2023 年 4 月中下旬，樟子松进入新一轮的生长季。不同于 2022 年同期，2023 年样木生长启动后迅速进入快速生长期，累积径向生长量持续增加，5 月份累积量最大，生长期内日径向生长速率最高可达 200 μm/d，此时水分亏缺量接近于零(图 3、图 4)。以上结果表明，樟子松径向生长始于 4 月中下旬，5—8 月期间基本完成年度生长，9 月后到次年的生长季开始前，径向生长停滞，树干收缩。值得注意的是，2022 年樟子松的年径向生长量(1.43 ± 0.33)mm 尚不足 2023 年上半年累积径向生长量(2.92 ± 0.38)mm 的一半，凸显了樟子松不同年份间生长特性的显著差异。

2.4 径向生长变化与气候因子的关系

线性混合效应模型结果(图 5)显示，在生长季内，樟子松日径向生长速率主要受气温、降水量、相对湿度和光合有效辐射的共同影响。其中，气温、降水量和相对湿度的上升，以及光合有效辐射的下降，均可对径向生长速率起到显著的促进作用。水分亏缺量则主要受相对湿度与日最低气温的调控，二者升高可显著缓解树木的水分亏缺。

Spearman 相关分析发现，降水量是长期持续影响樟子松日径向生长速率的关键因素，而其他气候因子对日径向生长速率的影响呈现出明显的时间差异性(图 6)。具体而言，温度(包括气温和土壤温度)主要在 2022 年的 7—8 月(即生长旺季)和 2023 年的 4—6 月显著促进径向生长。相比之下，相对湿度和饱和水汽压差仅对 2022 年的 4—6 月对日径向生长速率存在显著影响。进一步对比 2022 年与 2023 年同期(4—6 月)的气候因子影响，发现樟子松径向生长在 2022 年主要受降水、相对湿度和饱和水汽压差的显著影响，而 2023 年则主要受温度和降水的影响。尽管光合有效辐射对整个生长期的日径向生长速率有显著影响(图 5)，但针对不同生长时期，光合有效辐射的影响均不显著。水分亏缺量与气候因子之间的相关性大多与日径向生长速率相反。因此，综合考虑线性混合效应模型结果与相关分析结果，温度和水分是影响樟子松径向生长的关键因子。

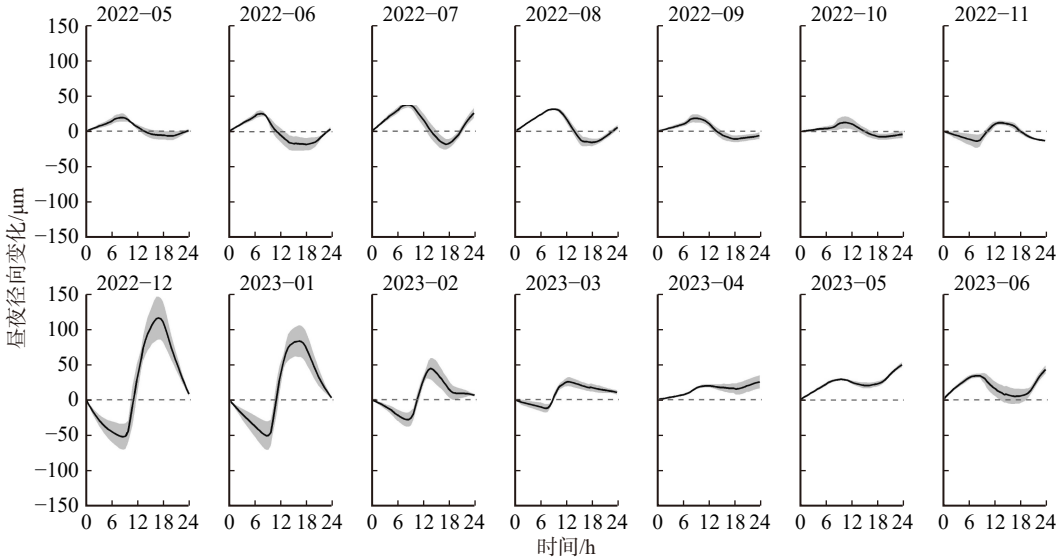
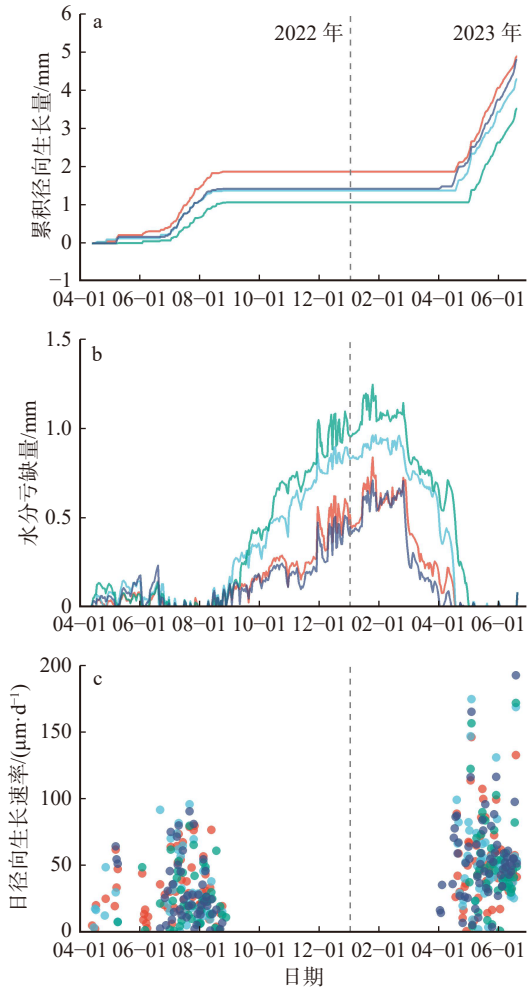


图 2 樟子松月平均昼夜径向变化特征

Fig. 2 Monthly mean diurnal radial variation characteristics of Mongolian pine



4 个颜色代表 4 株样本。

图 3　樟子松累积径向生长量、日水分亏缺量以及日径向生长速率

Fig. 3　Cumulative radial growth, daily water deficit and daily radial growth rate of Mongolian pine

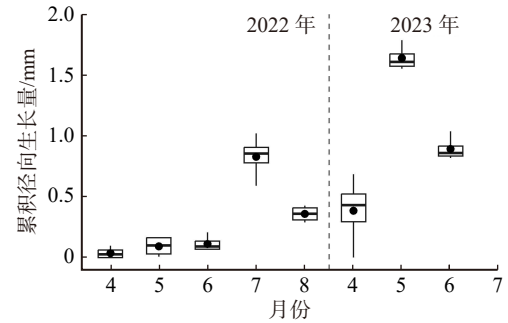
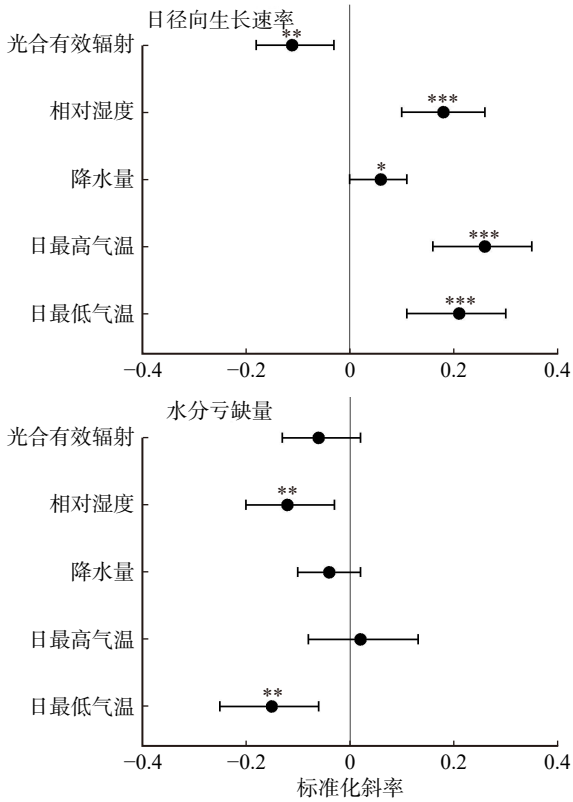


图 4　生长季各月份累积径向生长量

Fig. 4　Cumulative radial growth in each month of the growing season

3　讨　　论

深入了解树木年内径向生长过程及其与气候因子的关系，有利于准确认识森林生产力和物候特征对气候变化的响应机制，对制定合理的森林经营措施至关重要。本研究以毛乌素沙地樟子松为研究对象，通过分析径向生长的昼夜变化规律、季节性动态，以及与气候因子的关系，揭示了干旱胁迫下樟子松径向生长的季节动态及其气候敏感性，为气候变化背景下毛乌素沙地植被恢复和人工林可持续经营奠定了基础。



*, **, ***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著相关。下同。

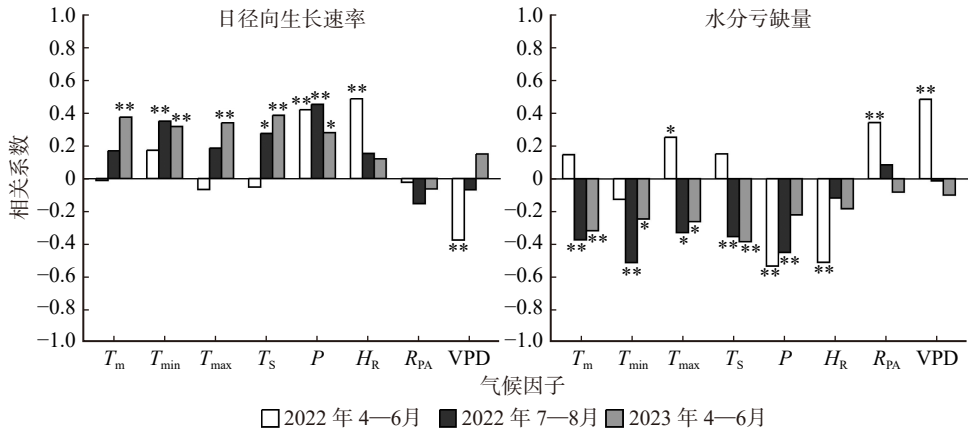
图 5　樟子松生长季生长速率和水分亏缺量与气候因子之间线性混合效应分析

Fig. 5　Linear mixed effect analysis of growth rate, water deficit and climatic factors during growing season of Mongolian pine

3.1　昼夜径向变化特征及其与气候因子的关系

树木昼夜径向变化直接反映了水分在大气—树木—土壤系统中的动态平衡[3]。暖热季节，樟子松茎干收缩通常发生于日间(上午 09:00 至傍晚)，此时冠层蒸腾耗水量超过根系吸水量，木质部水势降低，导致活细胞内水分流向木质部导管，细胞膨胀率随之下降，引起树干收缩；傍晚之后，蒸腾作用减弱，根系吸水量超过蒸腾失水量，茎干水势升高，使水分从木质部导管流向活细胞，导致树干膨胀[3,11]。因此，昼夜变化特征可视为树木日蒸腾耗水的表征指标，生长旺季因蒸腾作用加强导致昼夜变化幅度增大[25]。

寒冷季节树木休眠时，樟子松昼夜径向变化特征发生转变，呈现日间膨胀、夜间收缩的规律，气温取代蒸腾作用成为主导因子[11]。当夜晚温度降低至树液的冰点以下时，细胞外的水分开始冻结，诱导水分通过渗透作用从活细胞(主要为树皮细胞)渗出，引起树干收缩[26]；白天温度上升后，上述过程发生逆



T_m. 日平均气温; T_{min}. 日最低气温; T_{max}. 日最高气温; T_S. 10 cm 深处土壤温度; P. 降水量; H_R. 相对湿度; R_{PA}. 光合有效辐射; VPD. 饱和水汽压差。

图 6 不同生长时期日径向生长速率和水分亏缺量与气候因子的关系

Fig. 6 Relationship between daily radial growth rate, water deficit and climatic factors in varied growth periods

转，水分回流到活细胞中，促使茎干膨胀并达到当日最大值[11]。寒冷季节昼夜径向变化特征被认为是树液冰点附近温度变化引起的渗透水运动[26]，体现了树木体内水分的冻融变化过程。

毛乌素沙地樟子松昼夜径向变化的季节性波动特征与我国塞罕坝地区樟子松[11]和瑞士阿尔卑斯山落叶松(*Larix gmellini*)[12]的研究结果相似，但冬季昼夜变化幅度明显强于夏季，该现象与塞罕坝地区樟子松一致，可能是由研究区夜间温度低且昼夜温差大的环境条件引起[12]。有研究[11]表明，茎干收缩时间长度和剧烈程度与冬季气温降低程度正相关，即气温越低，茎干收缩时间越长且收缩幅度越大，原因可能是温度的骤降促使更大体积的水分发生冻结，进而引发更为剧烈的茎干收缩。本研究结果为研究冻融交替对树木径向变化的影响提供了可能。

3.2 径向变化的季节特征及其与气候因子的关系

温度是调控春季木质部形成层活动的关键因素，温度升高有利于生长季的提前启动[18]。随着气温的逐渐回升，毛乌素沙地樟子松径向生长于 4 月中下旬开始萌动。此外，本研究显示，气温升高对毛乌素沙地樟子松的日径向生长速率具有显著的促进作用，这与温带地区的多项研究结果[20, 27]相契合。具体而言，温度升高激发了树木的代谢活力，加速了生长素的合成与运输，并通过增强蒸腾作用和光合作用，进一步推动了日径向生长速率的提升[14,16]。因此，在因低温而生产力受限的地区，只要水分充足，温度的适度上升可提高树木的日径向生长速率[14]。

除温度外，水分条件同样对树木的快速生长起决定性作用[16]。尽管 2022 年 4—6 月的温度并不低于 2023 年同期，但树木的生长却明显迟缓，这可能主要由当时不利的空气水分条件所致，较低的相对湿度和较高的饱和水汽压差显著抑制了樟子松的径向生长(图 6)。相比之下，2023 年 5 月樟子松生长迅速，可能很大程度上得益于生长季初期良好的水分状况。前一年的降雪以及 4 月下旬的适时中雨，不仅有效补充了土壤水分，还改善了相对湿度条件，降低了饱和水汽压差，从而减轻了叶片的蒸腾作用，确保了木质部细胞内水分的充足供应，为形成层分化出大量细胞提供了有力支持。

光合有效辐射是树木进行光合作用的能量基石，适宜的光合有效辐射能促进碳同化过程并加快生长速率。然而，过高的光合有效辐射会造成光饱和现象，使光合速率无法进一步提升，而叶片的蒸腾作用却依然维持在较高水平，这导致木质部水分大量流失，活细胞内水势随之下降，最终抑制生长[17]。尤其在水分供应紧张的毛乌素沙地中，由于降水稀少且日照强烈，这种光饱和现象尤为明显，成为光合有效辐射抑制樟子松生长的关键因素。

樟子松的主要生长季节为 5—8 月，与温带树种的生长周期相吻合[12,16]。夏季温度适宜、降水增加，樟子松的日径向生长速率达到峰值(图 3)，累积径向生长量也最高(图 4)。9 月后，樟子松茎干增粗停滞，径向生长基本结束，标志着木质部细胞分化的完成。尽管在寒冷地区，气温可能是生长停止的关键因子[18]，但气温与生长停止之间的相关性在不同年份变异很大，表明生长结束不仅受气候影响[9,28]，更可能受先前细胞分化阶段的调控[28]。研究[29]表明，黑云杉(*Picea mariana*)木质部生长的终止与其生长季内细胞分裂数量直接相关，细胞数量越多，生长季越晚结束。因此，为了更准确地界定毛乌素沙地樟子松的生长季物候特征，未来有必要采用微树芯技术，开展樟子松形成层细胞活动的解剖学研究。

4 结　　论

本研究采用高精度径向生长仪，分析了 2022 年 4 月—2023 年 6 月期间毛乌素沙地樟子松在不同季节的昼夜径向变化特征、径向变化季节动态以及径向变化与气候因子的关联性，研究得到以下结论。

(1)樟子松在暖热季节(2022 年 5—10 月、2023 年 4—6 月)表现为白天收缩、夜间膨胀的昼夜径向生长变化模式；寒冷季节(2022 年 11 月至次年 3 月)则相反，且在 12 月和 1 月昼夜径向生长变化波动更为剧烈。

(2)樟子松径向生长于 4 月中下旬开始萌动，5—8 月期间基本完成当年生长，9 月后径向生长停滞并逐渐收缩。

(3)樟子松日径向生长速率在整个生长时期内与相对湿度、降水量和气温呈显著正相关，而与光合有效辐射呈显著负相关；但针对特定生长时期，日径向生长速率与光合有效辐射均无显著相关关系。水分亏缺量和气候因子之间的相关性大多与日径向生长速率相反。温度和水分是影响樟子松径向生长的关键因子。

研究结果有助于深入认识毛乌素沙地樟子松生长的季节动态和气候敏感性，为气候变化背景下毛乌素沙地樟子松人工林可持续经营提供参考。高精度径向生长仪是评估树木生长与气候因素相互作用的关键手段，未来可结合形成层活动解剖学分析，更准确地认识树木的径向生长过程及其气候响应规律，这对气候变化下毛乌素沙地人工林发展和生态保护具有重要意义。

致谢　感谢中国科学院内蒙古鄂尔多斯草地生态系统国家野外科学观测研究站提供气象观测数据。

参　考　文　献

[1] Fritts H C. Tree rings and climate[M]. New York: Academic Press, 1976.

[2] Askarieh A, del Rio M, Aldea J, et al. Radial increment dynamics of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in pure and mixed stands with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under changing environmental conditions[J]. European Journal of Forest Research, 2024, 143: 671−686.

[3] 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.

[4] Li J T, Xie Y Y, Wulan T Y, et al. Drought resilience of Mongolian Scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) at the southernmost edge of its natural distribution: a comparison of natural forests and plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2023, 542: 121104.

[5] Weigel R, Enerel B B, Dulamsuren C, et al. Summer drought exposure, stand structure, and soil properties jointly control the growth of European beech along a steep precipitation gradient in northern Germany[J]. Global Change Biology, 2023, 29(3): 763−779.

[6] Zhao Y, Li J X, Jin Y T, et al. Critical stage temperatures in early spring modulate the growing season onset of *Pinus tabuliformis* in Shenyang[J]. Trees, 2024, 38(1): 205−219.

[7] Morino K, Minor R L, Barron-Gafford G A, et al. Bimodal cambial activity and false-ring formation in conifers under a monsoon climate[J]. Tree Physiology, 2021, 41(10): 1893−1905.

[8] Deslauriers A, Rossi S, Anfodillo T. Dendrometer and intra-annual tree growth: what kind of information can be inferred? [J] Dendrochronologia, 2007, 25(2): 113−124.

[9] Etzold S, Sterck F, Bose A K, et al. Number of growth days and not length of the growth period determines radial stem growth of temperate trees[J]. Ecology Letters, 2022, 25(2): 427−439.

[10] Deslauriers A, Morin H, Urbinati C, et al. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Québec (Canada)[J]. Trees, 2003, 17(6): 477−484.

[11] King G, Fonti P, Nievergelt D, et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 ℃ natural warming gradient[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 168: 36−46.

[12] 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.
Ji Q W, Zheng C Y, Zhang L, et al. Stem radial growth dynamics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and their relationship with meteorological factor in Saihanba, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(3): 257−265.

[13] 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.

[14] Zhou B, Sterck F, Kruijt B, et al. Diel and seasonal stem growth responses to climatic variation are consistent across species in a subtropical tree community[J]. New Phytologist, 2023, 240(6): 2253−2264.

[15] 薛峰, 江源, 董满宇, 等. 不同去趋势方法对基于 Dendrometer 数据的茎干水分动态分析的影响: 以白扦为例 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(8): 880−890.
Xue F, Jiang Y, Dong M Y, et al. Influence of different de-trending methods on stem water relations of *Picea meyeri* derived from Dendrometer measurements[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(8): 880−890.

[16] van der Maaten E, Pape J, van der Maaten-Theunissen M, et al. Distinct growth phenology but similar daily stem dynamics in three co-occurring broadleaved tree species[J]. Tree Physiology, 2018, 38(12): 1820−1828.

[17] Zhang J Z, Gou X H, Wang Y T, et al. Impacts of site aridity on

intra-annual radial variation of two alpine coniferous species in cold and dry ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111420.

[18] Rossi S, Deslauriers A, Griçar J, et al. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates[J]. Global Ecology and Biogeography, 2008, 17(6): 696−707.

[19] 孟盛旺, 杨风亭, 戴晓琴, 等. 杉木径向生长动态及其对季节性干旱的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3521−3530.
Meng S W, Yang F T, Dai X Q, et al. Radial growth dynamics of Chinese fir and its response to seasonal drought[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3521−3530.

[20] Tumajer J, Scharnweber T, Smiljanic M, et al. Limitation by vapour pressure deficit shapes different intra-annual growth patterns of diffuse- and ring-porous temperate broadleaves[J]. New Phytologist, 2022, 233(6): 2429−2441.

[21] Cuny H E, Rathgeber C B K, Franois L, et al. Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in northeast France[J]. Tree Physiology, 2012, 32(5): 612−625.

[22] Michelot A, Simard S, Rathgeber C, et al. Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica, Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics[J]. Tree Physiology, 2012, 32(8): 1033−1045.

[23] Zhang R B, Yuan Y J, Gou X H, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains[J]. Dendrochronologia, 2016, 40: 36−42.

[24] Dietrich L, Zweifel R, Kahmen A. Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees[J]. Tree Physiology, 2018, 38(7): 941−952.

[25] Deslauriers A, Anfodillo T, Rossi S, et al. Using simple causal modeling to understand how water and temperature affect daily stem radial variation in trees[J]. Tree Physiology, 2007, 27(8): 1125−1136.

[26] Zweifel R, Hasler R. Frost-induced reversible shrinkage of bark of mature subalpine conifers[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102: 213−222.

[27] Aldea J, Bravo F, Vazquez-Pique J, et al. Species-specific weather response in the daily stem variation cycles of Mediterranean pine-oak mixed stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256: 220−230.

[28] 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: 108−114.

[29] Lupi C, Morin H, Deslauriers A, et al. Xylem phenology and wood production: resolving the chicken-or-egg dilemma[J]. Plant Cell and Environment, 2010, 33(10): 1721−1730.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 臧润国）