

暖温带马尾松茎干径向变化特征及其对环境因子的响应

师志强,章异平,罗鹏飞,竹磊,翟乐鑫,侯佳玉,徐军亮*

(河南科技大学 园艺与植物保护学院,河南 洛阳 471000)

摘要:探究短时间(月、日)尺度上马尾松生长动态变化及其与环境因子之间的关系,为理解和预测气候变暖对马尾松生长的影响提供科学依据。从2019年6月—2020年5月,通过树干径向生长测量仪(DENDROMETER)和小型气象站,对马尾松茎干年内径向变化和同期环境数据进行连续监测。结果表明:1)马尾松茎干径向日变化呈现昼缩夜胀的基本规律,马尾松茎干半径在8:00—16:00下降到最小值,16:00至次日8:00上升到最大值,年内径向变化范围为 $-54.4\sim 38.1\mu\text{m}$ 。2)马尾松月累积茎干径向变化量存在2个峰值,分别出现在6月和9月,为 $943.3\mu\text{m}$ 和 $823.6\mu\text{m}$ 。3)在非生长季(11月至次年2月),马尾松日径向变化量与土壤含水量、空气湿度、降水量存在正相关关系($P<0.05$),与VPD存在负相关关系($P<0.01$)。在生长季初期(3—5月),马尾松日径向变化量与空气温度、土壤温度和VPD呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤含水量呈极显著负相关。但在生长季中后期(6—10月),马尾松日径向变化量与空气温度、土壤温度和VPD的相关关系由正转负,与土壤含水量的相关关系由负转正。这种转变主要是因为生长季初期,较高的温度和土壤含水量有利于马尾松日径向变化量的增加,而生长季中后期,过高的温度和较低的土壤含水量则抑制马尾松日径向变化量的增加。研究结果有助于进一步了解暖温带马尾松树木茎干的径向变化及其对环境变化的响应特征,为判断马尾松未来的生长趋势提供科学依据。

关键词:马尾松;Dendrometer;径向变化;环境因子

中图分类号:S791.248

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)06-0040-08

Characteristics of the Variations of Stem and Radial Growth of *Pinus massoniana* and Responses to Environmental Factors in Warm Temperate Zone

SHI Zhi-qiang, ZHANG Yi-ping, LUO Peng-fei, ZHU Lei, ZHAI Le-xin, HOU Jia-yu, XU Jun-liang*

(College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: This study aimed to explore the growth dynamics of *Pinus massoniana* and the relationship with environmental factors in a short time scale (daily, monthly) to provide scientific basis for understanding and predicting the effects of climate warming on the growth of *P. massoniana*. Dendrometer and small-scaled meteorological station were used to record the stem radial variations of *P. massoniana* and environmental data from June 2019 to May 2020. The results showed that 1) Daily fluctuations in stem radial variation of *P. massoniana* showed a rhythm which shrunken in daytime and expanded at night. The stem radius decreased from 8:00 to 16:00 and reached the minimum values around 16:00, then increased from 16:00 to 8:00 and reached the maximum values around 8:00 in the following morning. The range of diurnal stem radial variation within a year was from $-54.4\mu\text{m}$ to $38.1\mu\text{m}$. 2) Monthly accumulation in radial variation showed two peaks, which occurred in June ($943.3\mu\text{m}$) and September ($823.6\mu\text{m}$), respectively. 3) In the

收稿日期:2021-09-30 修回日期:2021-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42271057、41801026、41401063);国家留学基金项目(201808410575、201908410061);河南科技大学大学生科研训练计划项目(2021398)。

第一作者:师志强。研究方向:树木水分生理生态学。E-mail:18438615570@163.com

*通信作者:徐军亮,博士,副教授。研究方向:树木水分生理生态学。E-mail:xjl_790626@126.com

non-growth season (November–February), the diurnal radial variation responded positively to soil water content, relative humidity and precipitation ($P < 0.05$), whereas negatively to vapor pressure deficit (VPD) ($P < 0.01$). In the early growth season (March–May), positive correlation were observed between the diurnal radial variation and air temperature, soil temperature and VPD ($P < 0.01$), while it was negatively correlated with soil water content. However, the opposite results were found during the middle and late growth season (June–October). The stem diurnal radial variation was negatively related to air temperature, soil temperature and VPD, and was positively related to soil water content. These inverse environment-tree growth relationships could be explained by the facts that warm and moist conditions were beneficial to boost the radial growth in the early growth season. While in the middle and later stages of growth season, lower water availability conditions, i. e. high temperature and low soil water content, probably inhibited the radial stem increment. These results can help to understand the radial variation of *P. massoniana* in the warm temperate zone and its response characteristics to environmental changes, and to provide scientific basis for judging the future growth trend of *P. massoniana*.

Key words: *Pinus massoniana*; Dendrometer; radial variation; environmental factor

树木生长除受自身基因型^[1]和生理过程^[2]等内源因素的影响外,光照、水分等外源环境条件对树木生长亦有重要影响^[3]。研究环境因子和树木生长之间的关系,有利于探讨气候变化对树木生长过程的影响。以往对于树木径向生长的研究主要通过树轮年代学来实现,树木年轮包含了树木每年的气候变化信息,成为研究树木对气候变化响应的重要材料^[4-5]。这部分研究通过长时间序列(百年或千年)的树木的生长规律来反映气候变化。然而,树木生长并不匀速,因此与气候因子并非简单的线性关系,而是受生长阶段影响的非线性关系^[6]。因此,仅从长时间年际序列来理解环境因子对树木生长的影响存在一定的局限性,有必要从短时间序列来探索树木径向生长与气候之间的相关关系,加深气候变化对树木生长影响的理解。

径向生长测量仪(DENDROMETER)是一种高精度的,高分辨率的,能够自动连续监测树木径向生长的仪器^[7-8]。可有效地从树木生理生态学的角度,来分析树木径向生长与环境因子之间的响应,因此近年来被广泛应用^[9-10]。21世纪以来,众多国内外学者使用径向生长测量仪来探究树木径向生长与环境因子之间的关系。A. Deslauriers等^[11]对加拿大魁北克北方森林的胶冷杉(*Abies balsamea*)径向生长的研究表明,降水是影响树木径向生长的主要环境因子。A. Gruber等^[12]对阿尔卑斯山内树种的树木径向变化的研究发现,温度是影响树干径向日变化量的主要环境因子。在芦芽山地区,董满宇等^[13]研究表明,土壤温度是影响华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)径向生长的主要影响因子。同一地区白杆^[14](*Picea meyeri*)在茎干快速生长期,径向生长也受土壤温度的影响。但是在茎干脱

水收缩期,土壤含水量对白杆累积茎干径向变化的影响增加。在处于干旱区的祁连山地区,水分是限制树木径向生长的主要因素。但也有研究认为,热带地区的苦楝^[15](*Melia azedarach*)径向生长同样受水分的限制。由此可知,树木生长与环境因子的关系存在较大的区域差异性。目前相关研究主要集中在热带地区和高山林线地区,对暖温带地区的研究甚少。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方荒山造林的主要树种之一^[16],是中国亚热带地区植被恢复的先锋树种^[17],也是亚热带东部地区的乡土树种^[18]。由于马尾松年轮界线清晰,它也是我国亚热带地区树轮气候学的主要树种之一^[19]。已有研究表明,不同区域条件下的水热组合使得马尾松径向生长对气候的响应存在区域差异。在马尾松分布的南界,侯爱敏等^[17]研究表明,夏季高温成为马尾松径向生长的主要限制因子。在分布中心地区^[20],生长季早期的温度升高对马尾松径向生长有利,而后期受温度和降水的综合影响。而在北界信阳地区^[21],温度不再制约马尾松的生长,水分是影响马尾松径向生长的主要环境因子。这些研究结果均以马尾松轮宽为指标开展的年际间研究,而对马尾松在短时间尺度的年内研究还相对较少^[22],且研究区域主要位于亚热带地区。对于年内马尾松和环境因子之间的关系尚不清楚。因此,本研究在马尾松分布北界的暖温带地区(河南洛阳),使用径向生长测量仪对马尾松年内径向生长动态进行了1a的连续监测。研究马尾松茎干径向变化动态,分析不同时间尺度上(日、月、季节)树木茎干径向变化特征。探讨马尾松径向变化与环境因子的相关关系,旨在为马尾松林的经营管理制定合理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究地点位于河南省洛阳市河南科技大学校园内西北角(34°36'N, 112°24'E), 属于暖温带大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 春秋季节较短。选取距离样地最近的国家气象站孟津站多年气象数据(1960—2018)(图 1)可知, 研究区年均总日照时数为 2 198.3 h, 年均温 14.2 °C, 月最高空气温度 26.4 °C, 出现在 7 月, 月最低空气温度 0 °C, 出现在 1 月。年均总降水量 620.4 mm, 全年 63% 的降水主要集中在 6—9 月, 其中 7 月份降水最多, 达到 140.9 mm。样树周围有悬铃木(*Platanus acerifolia*)、紫叶李(*Prunus cerasifera*)、大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)、圆柏(*Sabina chinensis*)和石楠(*Photinia serratifolia*)等树种。

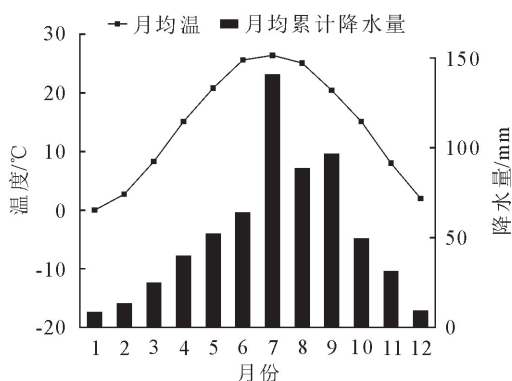


图 1 孟津气象站 1960—2018 年月均温和月均累积降水量

Fig. 1 Monthly mean temperature and monthly accumulation precipitation of Mengjin meteorological station from 1960 to 2018

1.2 数据采集和处理方法

1.2.1 马尾松径向生长数据采集处理 选取长势良好, 树高和胸径相近的 3 棵马尾松作为试验对象(表 1)。在马尾松树高 1.3 m 处安装点触式树木径向生长测量仪(Point DENDROMETER, Ecomatik, Germany), 安装时应首先剥去树干外部的死树皮, 以减少树皮水分变化对树干径向生长监测数据的影响^[23]。在 2019 年 6 月—2020 年 5 月, 持续监测马尾松树干径向变化, 以 10 min 为间隔时间自动记录并保存数据。

通常情况下, 径向变化测量仪监测树木的径向生长信息包含 2 部分: 一部分是由树木茎干水分波动引起的可逆的收缩与膨胀变化, 另一部分是树木茎干形成层细胞分裂与木质部生长引起的不可逆的变化^[10]。采用 A. Deslaurier 等^[11]的方法, 根据连续 5 d 的树木茎干径向日变化量的均值与零值的差异来确定生长季的开始日期和结束日期。若两者之

间存在显著性差异(独立样本 T 检验), 则确定连续 5 d 的首日为生长开始日。同理, 若两者之间不存在显著性差异, 则以连续 5 d 的首日为生长结束日。同时, 依据 O. Bouriaud 等^[24]提出的最大值法, 提取茎干日变化量, 具体做法为从每日获取的 144 个树木茎干原始值中, 提取最大值, 将当日最大值与后一日最大值之差作为当日树木茎干的日变化量, 在此基础上加和得到树木累积茎干径向变化量, 具体公式如下^[25]。

每日茎干径向变化量(ΔR , mm)公式为:

$$\Delta R_i = R_{\max(i+1)} - R_{\max(i)} \quad (1)$$

式中: ΔR_i 表示每日茎干径向变化量, $R_{\max(i+1)}$ 表示第 $i+1$ 天的茎干半径的最大值, $R_{\max(i)}$ 表示第 i 天的茎干半径最大值。

累积茎干径向变化量(R_{cum} , mm)公式为:

$$R_{\text{cum}} = \sum_{i=1}^n \Delta R_i \quad (2)$$

式中: R_{cum} 表示累积茎干径向变化量, ΔR_i 表示第 i 天的茎干径向变化量。

表 1 马尾松样树基本特征

Table 1 Basic characteristics of *Pinus massoniana* trees

编号	胸径/cm	树高/m	树龄/a	冠幅/m	
				东西	南北
1#	20.2	12.0	30	5.4	5.1
2#	25.3	14.0	35	7.7	8.1
3#	21.8	12.4	31	5.8	6.2

1.2.2 气象数据采集及处理 在样地内的空地上安装小型 HOBO-U30 自动气象站(ONSET, 美国)同步监测气象数据, 气象因子包括 10 cm 和 20 cm 土壤体积含水量(soil water content, SWC, m^3/m^3)、10 cm 和 20 cm 土壤温度(soil temperature, ST, °C)、空气温度(temperature, T, °C)、空气相对湿度(relative humidity, RH, %)、太阳辐射(solar radiation, SR, W/m^2)等, 记录时间间隔与 DENDROMETER 监测树木径向变化一致均为 10 min。降水量(precipitation, P, mm)数据来自中国气象数据网的孟津气象站, 网址为: <http://data.cma.cn/site/index.html>。饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD, kPa)根据经验公式^[26]获得, 计算公式如下:

$$V_{\text{PD}} = (1 - R_{\text{H}}) \times 0.6108 \times \exp^{\left(\frac{17.27 \times T}{T + 273.3}\right)} \quad (3)$$

式中: V_{PD} 表示饱和水汽压差, R_{H} 表示样地相对空气湿度, T 表示样地平均空气温度。

1.2.3 数据处理 首先对取得的实验数据进行初步检验, 剔除异常值, 为进一步分析数据提供保障。获取日尺度上的土壤体积含水量、土壤温度、空气相对

湿度、空气温度和降水量等环境因子,因仪器故障,10 cm 土壤体积含水量数据存在部分缺失。采用 Pearson 相关分析的方法分析马尾松茎干径向变化量与环境因子的相关性。文中数据统计分析利用 SPSS 25.0 和 OFFICE 2019 软件完成,图表制作用 ORIGIN 2018 完成。

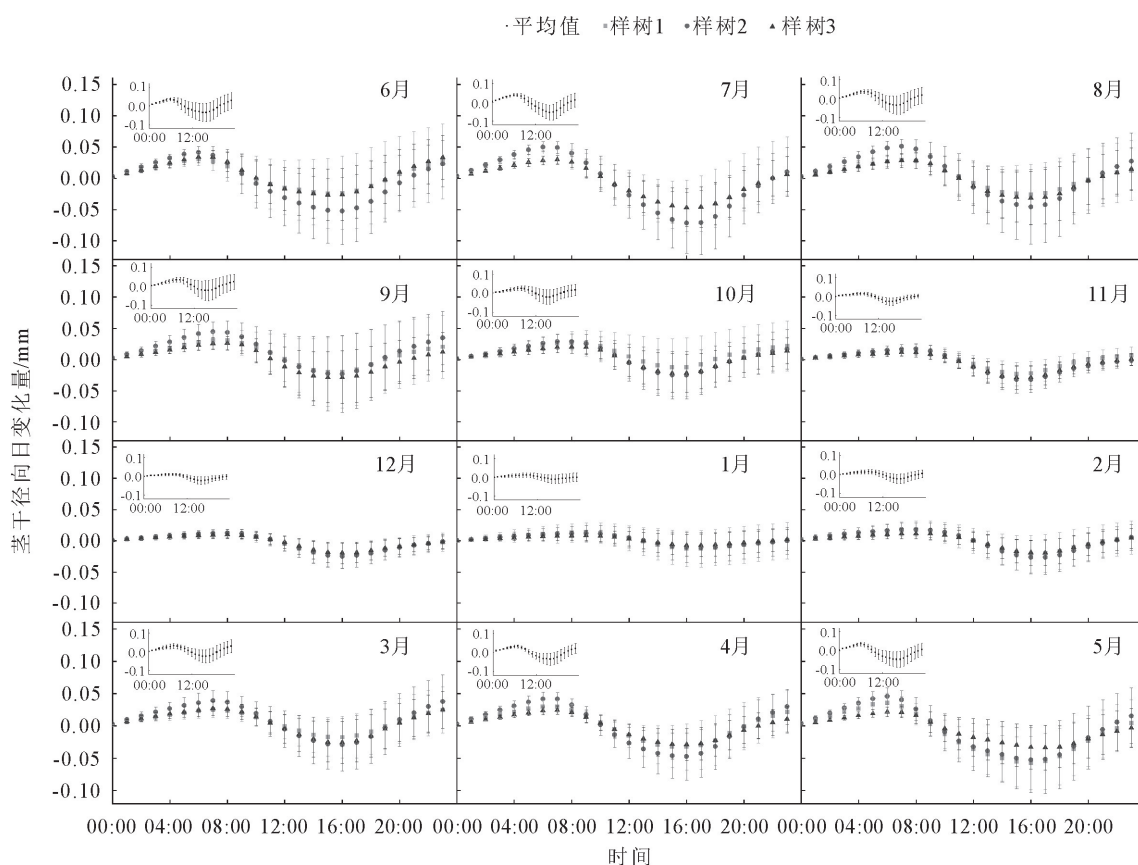
2 结果与分析

2.1 不同月份马尾松茎干径向日变化规律

由图 2 可以看出,在日尺度上马尾松茎干径向日变化规律为 0:00—8:00 茎干半径持续上升,8:00

—16:00 持续下降,16:00—次日 0 时持续上升。树木茎干半径最大值通常出现在 8:00,最小值出现在 16:00,不同月份之间稍有差异。3—10 月,随着树木茎干径向日变化的开始,树木茎干最大值出现的时间逐渐提前,最早出现在 6:00。11 月至次年 2 月,最大值出现的时间逐渐推迟,最晚出现在 9:00。

不同月份,马尾松年内茎干径向变化的振幅在 21.9~92.4 μm 波动,其中最大振幅出现在 7 月,最小振幅出现在 1 月。3—10 月径向日变化振幅都较为明显,相比而言,11 月至次年 2 月径向日变化趋于稳定,振幅较小。



注:左上方小图代表相应月份 3 棵样树径向日变化均值。

图 2 不同月份马尾松茎干径向日变化

Fig. 2 Diurnal stem radial variation of *P. massoniana* in different months

2.2 马尾松月累积茎干径向变化量

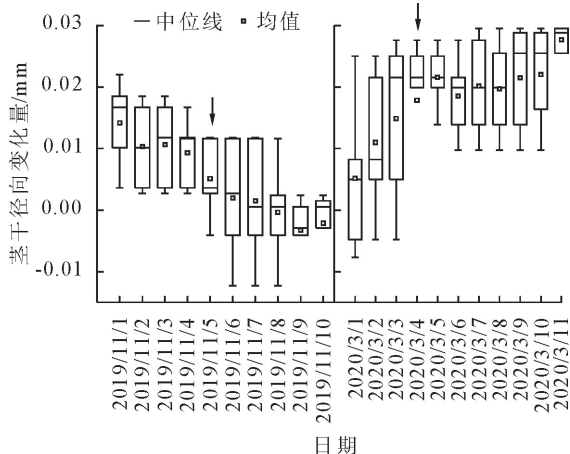
根据连续 5 d 马尾松径向生长结果显示(图 3),马尾松径向生长开始和结束时间分别为 3 月 4 日和 11 月 5 日。进一步结合马尾松月累积茎干径向变化量(图 4)来看,马尾松年内径向变化特征可以分为 3 个阶段。第 1 阶段:春季茎干复水期,3—5 月,随着温度的升高,马尾松月累积茎干径向变化量开始明显增加,3 月和 4 月马尾松茎干径向变化量分别达到 977.3 μm 和 722.1 μm ,5 月,在水热条件的影响下,茎干径向变化量为 301.5 μm 。第 2 阶段:夏秋茎干快速增长期。6—10 月,马尾松月累积茎

干径向变化量的范围为 517.7~943.3 μm ,累积茎干径向变化量最大的月份为 6 月,最小的月份为 7 月。第 3 阶段:冬季茎干稳定期。11 月至次年 2 月,马尾松累积茎干径向变化量在 -23.6~199.9 μm 起伏。2 月树木茎干会出现迅速变粗,从而导致树干径向变化量出现迅速增加。

2.3 气象因子对马尾松茎干径向变化量的影响

从图 5 可知,研究区样地年均空气温度为 16.5 $^{\circ}\text{C}$,月最高空气温度出现在 7 月为 28.5 $^{\circ}\text{C}$,月最低空气温度出现在 1 月为 2.8 $^{\circ}\text{C}$ 。年总降水量为 668.4 mm,降水最多的月份为 8 月,达到 192.7

mm。总的来说,10 cm 和 20 cm 的土壤温度相差不大,其年均值分别为 16.7 °C 和 16.8 °C,但在 2019 年 6—8 月和 2020 年 3—5 月,土壤温度 10 cm 大于 20 cm。与土壤温度一致,10 cm 土壤含水量总体上高于 20 cm,其年均值分别为 17% 和 14%,但在 6 月 21—27 日,土壤含水量 10 cm 小于 20 cm。2020 年 5 月,日最高空气温度达到 28.6 °C,平均温度 24.1 °C,土壤含水量 10 cm 和 20 cm 为整个生长季最低,分别为 16% 和 13%,VPD 达到 1.20 kPa。



注: ↓ 表示马尾松径向生长结束(左)和开始(右)。

图3 马尾松茎干径向生长节点

Fig. 3 The node of stem radial growth of *P. massoniana*

将 2019 年 6 月至 2020 年 5 月日尺度上马尾松茎干径向变化量与同期环境因子做 Pearson 相关分析(表 2),结果表明,3—5 月,土壤温度、空气温度和

VPD 与马尾松茎干径向变化量均为极显著正相关($P < 0.01$),而土壤含水量与马尾松茎干径向变化量存在极显著负相关($P < 0.01$)。6—10 月,相关分析结果相反,即土壤温度、空气温度和 VPD 与马尾松茎干径向变化量的关系由正相关变为负相关($P < 0.01$),而土壤含水量与马尾松茎干径向变化量的关系由负相关变为正相关($P < 0.05$)。这说明,生长季初期较高的温度有利于马尾松径向变化量的增加,而过高的温度反而抑制马尾松径向变化量的积累。11 月至次年 2 月,土壤含水量、相对湿度与马尾松径向变化量为极显著正相关($P < 0.01$),降水与马尾松径向变化量亦有显著正相关($P < 0.05$),而 VPD 则与马尾松茎干径向变化量呈现出极显著负相关的关系($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 结论

利用 DENDROMETER 监测仪连续监测了分布在暖温带马尾松的茎干径向生长动态。在马尾松分布的北界,马尾松茎干径向日变化规律为昼缩夜胀,8:00 为径向变化极大值,16:00 为径向变化极小值。马尾松年内茎干径向变化量分为 3 个阶段:春季茎干复水期,夏秋茎干快速增长期,冬季茎干稳定期。在不同阶段,影响茎干径向变化量的主要环境因子不同。温度是生长季(3—10 月)中控制马尾松茎干日变化量的主导因子。

表 2 马尾松日尺度茎干径向变化量与同期环境因子的 Pearson 相关关系

Table 2 Pearson correlation between diurnal radial variation of stem cumulation in *P. massoniana* and environmental factors in the same period

	SWC ₁₀	SWC ₂₀	ST ₁₀	ST ₂₀	T _{mean}	RH	P	VPD
生长季 (2019.6.1—2019.11.8)	0.177 *	0.408 **	-0.854 **	-0.813 **	-0.823 **	0.466 **	-0.062	-0.669 **
非生长季 (2019.11.9—2020.3.3)	0.677 **	0.592 **	0.045	-0.075	0.069	0.449 **	0.233 *	-0.352 **
生长季 (2020.3.4—2020.5.31)	NA	-0.850 **	0.866 **	0.892 **	0.720 **	-0.015	0.040	0.454 **

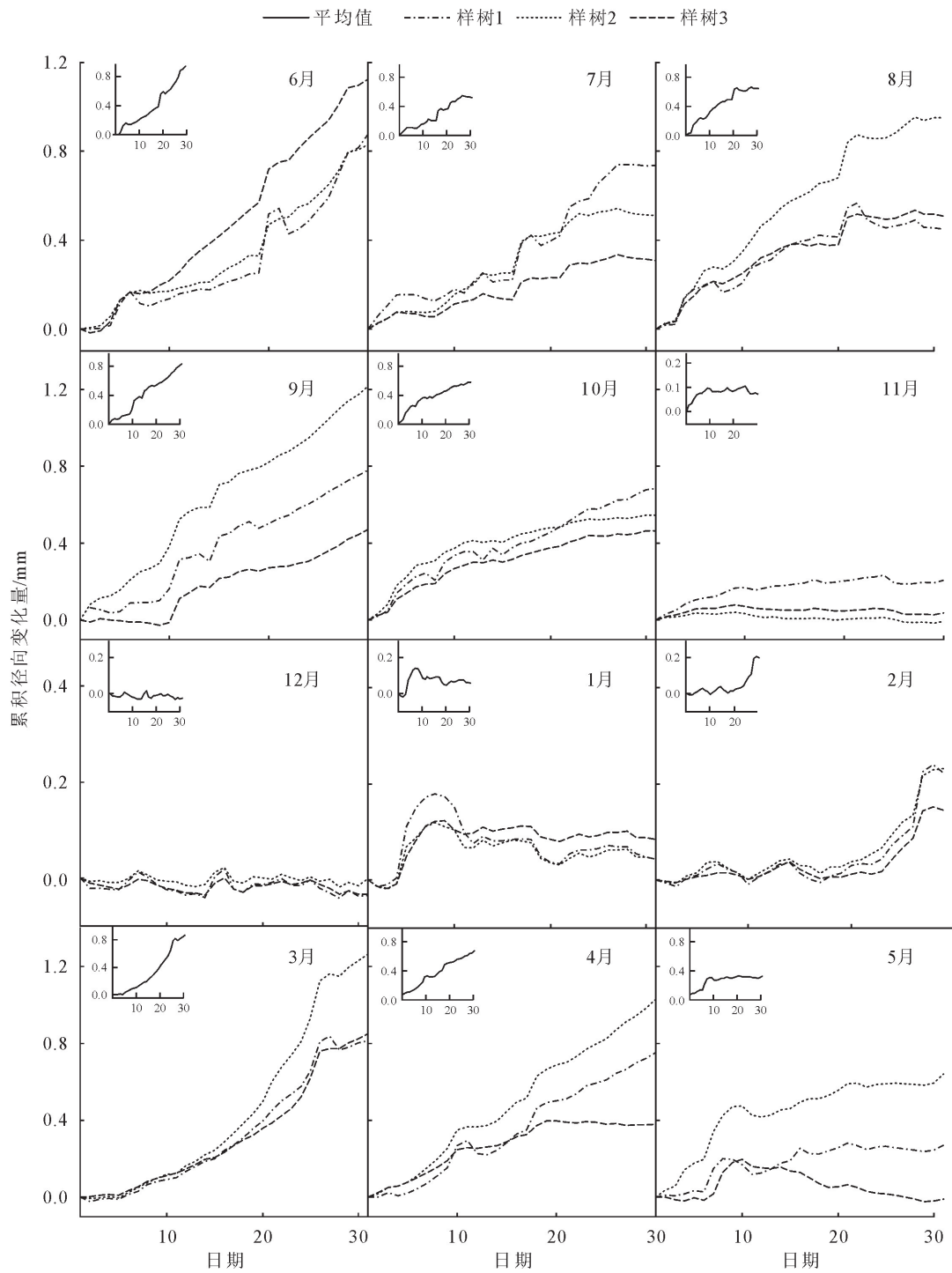
注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性极显著, * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。NA 表示数据缺失。

3.2 讨论

3.2.1 不同时间尺度马尾松茎干径向变化量特征

从日尺度来看,马尾松茎干径向日变化量和水分有紧密关系。马尾松茎干径向日变化表现为昼缩夜胀的规律,即在 0:00—8:00 增大,在 8:00 达到极大值,之后茎干开始收缩,在 16:00 缩至当天极小值,之后茎干又继续增大。在生长季,树木根部夜晚开始吸收水分,早上随着太阳升起,树木开始进行蒸腾作用,水分随着茎干运输到树冠部分。此时,蒸腾作用消耗的水分小于树木根部吸收的水分,水分被存储在茎干部分,使得树干半径增加^[27]。随着蒸腾作

用的增强,运输到树冠部分的水分增加,蒸腾耗水大于根部吸水,树木半径逐渐减小。到了傍晚,蒸腾作用减弱,茎干水分得以恢复,树木半径再次增加。这种树木茎干昼缩夜胀的日变化规律,不仅出现在马尾松,在瑞士阿尔卑斯山中部的欧洲落叶松(*Larix decidua*)和挪威云杉^[28](*Picea excelsa*);在祁连山地区的华北落叶松^[29](*L. principis-rupprechtii*),祁连圆柏^[29](*Juniperus przewalskii*)等都有发现。但也有研究表明,树木茎干径向日变化也可能呈现昼胀夜缩的规律,这与树种、海拔、纬度、气温和降水等综合因素有关^[30]。



注:左上方小图代表相应月份 3 棵样树的累积径向变化量均值。

图 4 马尾松月累积茎干径向变化量

Fig. 4 Radial variation of stem cumulation in *P. massoniana* in different months

从季节尺度来看(图 4),在生长季,马尾松月累积茎干径向变化量存在“双峰”现象,这与刘亚静^[31]、李颖俊^[32]的研究结果一致。本研究显示,春季(3—5 月),随着温度的回升,马尾松径向生长启动,月累积茎干径向变化量发生明显变化。夏秋季节,在 6 月和 9 月出现 2 个峰值,分别为 943.3 μm 和 823.6 μm 。冬季,温度降低,树木月累积茎干径向变化量基本为 0。2 月,随着温度升高,降水增加,

月累积茎干径向变化量增加,树干出现迅速增粗的假象^[33-34],这一假象很容易被误认为是树木生长^[11,35]。事实上,这是由于根部吸水所带来的茎干细胞中水分的变化,而并非生长所带来的茎干细胞生长。这一现象并不是马尾松独有的,在樟子松^[30] (*Pinus sylvestris*)、红松^[36] (*Pinus koraiensis*)、青杆^[23] (*Picea wilsonii*)和落叶松^[13] (*Larix gmelini*)等树种的研究中,均有发现。

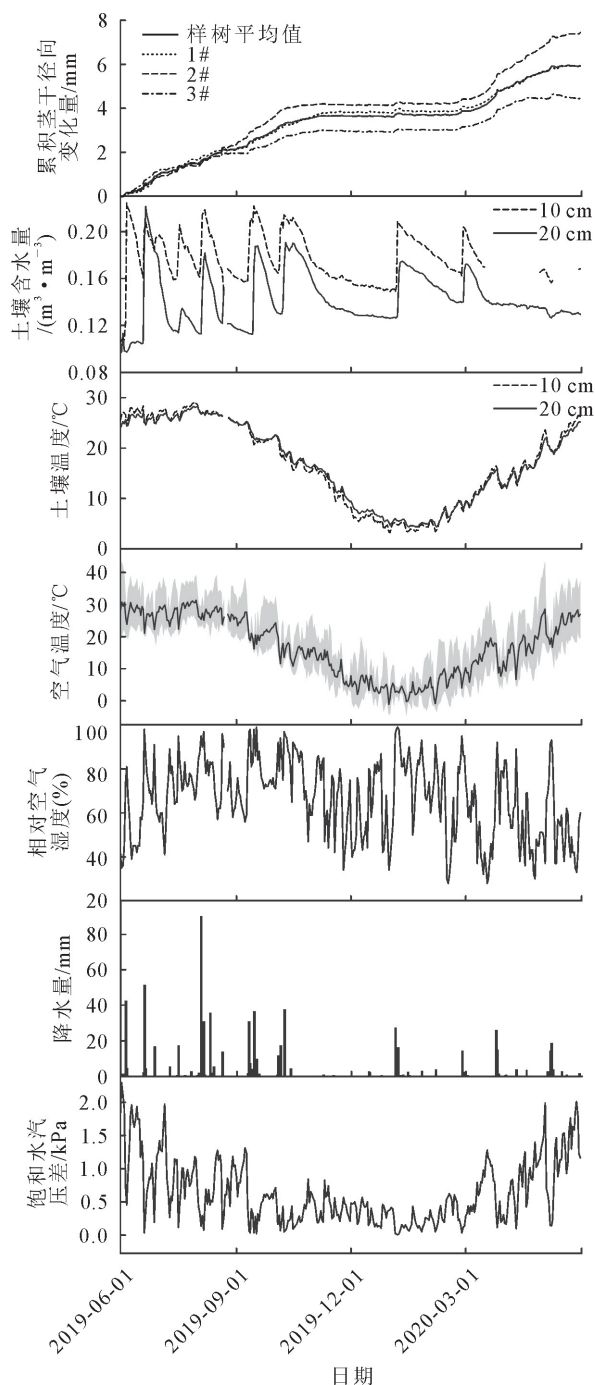


图5 马尾松累积茎干径向变化量及同期环境因子特征

Fig. 5 Radial variation of stem cumulation in *P. massoniana* and characteristics of environmental factors in the same period

3.2.2 马尾松茎干日变化量与环境因子的关系

树木生长受环境因子、树木生理特性等多因素的共同影响^[37]。因此,树木径向生长对气候变化的响应在不同生长阶段并不相同^[38]。在生长季,温度是影响马尾松茎干日变化量的主要因子。在非生长季,水分是控制马尾松茎干日变化量的主要因子(表2)。这可能是因为,在非生长季,温度降低,树木径向生长基本停止,此时,环境中水分的变化直接影响着树木茎干中水分的膨胀收缩。降水一方面会导致

空气湿度的上升,使树木茎干吸水膨胀;另一方面通过增加土壤含水量来影响树木茎干的径向生长。

值得注意的是,温度在生长季不同阶段的影响亦并不相同。在生长季初期(3—5月),温度升高可以促进马尾松径向生长。但在生长季中后期(6—10月),过高的温度反而起抑制作用(表2)。3月月均气温为13.1℃,10 cm和20 cm土壤含水量分别为18%和15%。此时,空气温度适宜,土壤含水量相对较高。马尾松茎干径向生长开始启动,植物光合作用也开始加强,树干水分变化波动幅度大,马尾松月累积茎干径向变化量有了明显的增大,达到977.3 μm。随着径向生长速度的加快,累积径向变化量在6月达到第1个高峰。之后,过高的空气温度和较低的土壤含水量可能对马尾松径向生长产生抑制作用,使得径向生长在7—8月出现暂时性的生长变缓,累积径向变化量在7—8月下降到577 μm。当空气温度下降至20℃左右时,土壤含水量略有回升,马尾松再次进入快速生长期,在9月径向变化量达到第2个高峰。马尾松的“双峰”现象在闽北地区也有发现^[31],其双峰值出现在5月和9月。但在湖北省秭归县地区的研究中^[39],却并未发现马尾松双峰这一生长特征。由此可见,马尾松双峰生长特征可能具有区域性,后期有必要在大区域尺度开展马尾松生长监测,这将有助于加深触发对马尾松双峰生长所需要的水热特征及其相关环境阈值的认识和理解。

参考文献:

- [1] ANDERSON J T, INOUE D W, MCKINNEY A M, *et al.* Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change[J]. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2012, 279(1743):3843-3852.
- [2] PALLARDY S G. *Physiology of Woody Plants* [M]. New York: Academic Press, 2006.
- [3] GRICAR J. Influence of temperature on cambial activity and cell differentiation in *Quercus sessiliflora* and *Acer pseudoplatanus* of different ages[J]. *Drvna Industrija*, 2013, 64(2):95-105.
- [4] STAGGE J H, ROSENBERG D E, DEROSE R J, *et al.* Monthly paleostreamflow reconstruction from annual tree-ring chronologies[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557:791-804.
- [5] ZHANG T W, YUAN Y J, CHEN F, *et al.* Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, Northwestern China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(1):53-67.
- [6] 王章勇, 杨保, 秦春, 等. 树木径向生长机制监测和模拟研究进展[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3):780-787.

WANG Z Y, YANG B, QIN C, *et al.* Research progress of the

- monitor and model of stem radius growth mechanism[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(3): 780-787. (in Chinese)
- [7] 王文彬. 黑河上游青海云杉树干径向变化及液流监测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [8] SEVANTO S. Tree stem diameter change measurements and sap flow in *Scots pine*[R]. Finland: University of Helsinki Report Series in Physics, 2003.
- [9] 刘新圣, 聂玉琴, 邱秀文, 等. 基于树木径向生长仪监测高寒地区树木生长和水分利用的研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, 28(3): 19-25.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] GRUBER A, ZIMMERMANN J, WIESER G, 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).
- [13] 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.
- DONG M Y, JIANG Y, WANG M C, et al. Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the tree-line of the Luya Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7430-7439. (in Chinese)
- [14] 董满宇, 江源, 杨浩春, 等. 芦芽山林线白杆生长季径向生长动态[J]. 植物生态学报, 2012, 36(9): 956-964.
- DONG M Y, JIANG Y, YANG H C, et al. Dynamics of stem radial growth of *Picea meyeri* during the growing season at the treeline of Luya Mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(9): 956-964. (in Chinese)
- [15] 吴丽杰, KAEWMANO A, 付培立, 等. 热带季节性湿润林苦楝(*Melia azedarach*)径向生长季节动态及其对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6831-6840.
- WU L J, KAEWMANO A, FU P L, et al. Intra-annual radial growth of *Melia azedarach* in a tropical moist seasonal forest and its response to environmental factors in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6831-6840. (in Chinese)
- [16] 陆晓辉, 丁贵杰, 陆德辉. 人工调控措施对马尾松凋落叶分解速率的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 25-29.
- LU X H, DING G J, LU D H. Impact of different control measures on needle litter decomposition rate under pure *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 25-29. (in Chinese)
- [17] 侯爱敏, 周国逸, 彭少麟. 鼎湖山马尾松径向生长动态与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 637-639.
- HOU A M, ZHOU G Y, PENG S L. Relationship between climatic factors and radial growth of *Pinus massoniana* in Dinghushan Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 637-639. (in Chinese)
- [18] 秦国峰. 马尾松地理起源及进化繁衍规律的探讨[J]. 林业科学研究, 2002, (4): 406-412.
- QIN G F. Geographical origin and evolution of masson pine [J]. Forest Research, 2002, 15(4): 406-412. (in Chinese)
- [19] 顾洪亮, 王建, 商志远, 等. 马尾松树轮早材、晚材年表对气候因子响应的敏感性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1150-1162.
- GU H L, WANG J, SHANG Z Y, et al. Divergence response of earlywood, latewood chronologies of *Pinus massoniana* to climatic factors[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1150-1162. (in Chinese)
- [20] 马丽娟. 马尾松树轮宽度对气候因子响应的地域差异分析[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [21] 封晓辉. 气候变化对中国马尾松径向生长的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [22] MENG S W, FU X L, ZHAO B, et al. Intra-annual radial growth and its climate response for masson pine and Chinese fir in subtropical China[J]. Trees-Structure and Function, 2021.
- [23] 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.
- NIU H G, ZHANG F, YU A L, et al. Response of radial growth dynamics to climate in the eastern Qilian Mountains of *Picea wilsonii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7412-7420. (in Chinese)
- [24] 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): 651-660.
- [25] DONG M Y, JIANG Y, ZHANG W T, et al. Effect of alpine Treeline conditions on the response of the stem radial variation of *Picea meyeri* Rebd. Et Wils to environmental factors [J]. Polish Journal of Ecology, 2011, 59(4): 729-739.
- [26] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 胡杨夜间液流量及其影响因子研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1173-1180.
- ZHAO C Y, SI J H, FENG Q, et al. Nighttime sap flux of *Populus euphratica* and the environment factors influencing it[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1173-1180. (in Chinese)
- [27] SEVANTO S, HOLT T, HOLBROOK N M. Effects of the hydraulic coupling between xylem and phloem on diurnal phloem diameter variation[J]. Plant Cell and Environment, 2011, 34(4): 690-703.
- [28] KING G, FONTI P, NIEVERGELT D, et al. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 degrees C natural warming gradient[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 168: 36-46.
- [29] 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.
- [30] 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. (in Chinese)

- [14] DAI P, ZONG Z, MA Q, *et al.* Isolation, evaluation and identification of rhizosphere actinomycetes with potential application for biocontrol of *Valsa mali* [J]. European journal of plant pathology, 2019, 153(1): 119-130.
- [15] 张俊娥. 金黄壳囊孢菌侵染杨树的病理学过程[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [16] ZHANG F, LI X L, ZHU S J, *et al.* Biocontrol potential of *Paenibacillus polymyxa* against *Verticillium dahliae* infecting cotton plants[J]. Biological Control, 2018, 127: 70-77.
- [17] 卢美欢, 李利军, 马英辉, 等. 埃吉类芽孢杆菌 SWL-W8 的鉴定及其对白莱软腐病的生物防治效果[J]. 农药学报, 2020, 22(5): 791-800.
- LU M H, LI L J, MA Y H, *et al.* Identification of a strain *Paenibacillus elgii* SWL-W8 and its biocontrol effect against soft rot of Chinese cabbage[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(5): 791-800. (in Chinese)
- [18] MARCELA V V D, LEONARDO C, NUBIA C M S, *et al.* Antifungal activity of marine-derived *Paenibacillus* sp. PNM200 against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, the causal agent of tomato vascular wilt[J]. Biological Control, 2020, 154: 104501.
- [19] TSENG S C, LIU S Y, YANG H H, *et al.* Proteomic study of biocontrol mechanisms of *Trichoderma harzianum* ETS 323 in response to *Rhizoctonia solani* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(16): 6914-6922.
- [20] 岳朝阳, 张新平, 马沛沛, 等. 新疆杨树不同种、品种(无性系)造林初期对腐烂病的抗性研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(1): 113-118.
- YUE C Y, ZHANG X P, MA P P, *et al.* Resistance of different Poplars in the initial afforestation stage on *Cytospora chrysosperma* in Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 206(1): 113-118. (in Chinese)
- [21] LI J, LIU W, LUO L, *et al.* Expression of *Paenibacillus polymyxa* β -1,3-1,4-glucanase in *Streptomyces lydicus* A01 improves its biocontrol effect against *Botrytis cinerea* [J]. Biological Control, 2015, 90: 141-147.
- [22] KIM Y C, HUR J Y, PARK S K. Biocontrol of *Botrytis cinerea* by chitin-based cultures of *Paenibacillus elgii* HOA73[J]. European Journal of Plant Pathology, 2019, 155(1): 253-263.
- [23] YU W Q, ZHENG G P, YAN F C, *et al.* *Paenibacillus terrae* NK3-4: A potential biocontrol agent that produces β -1,3-glucanase[J]. Biological Control, 2019, 129: 92-101.
- [24] 胡亮亮, 徐汉虹, 廖美德. 胶冻样类芽孢杆菌 PS04 产抗真菌物质培养条件的优化[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(3): 276-279.
- HU L L, XU H H, LIAO M D. Optimization of culture conditions for a strain of PS04 producing antifungal antibiotics[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2011, 30(3): 276-279. (in Chinese)
- [25] 陈浩. 多粘类芽孢杆菌 X33 发酵条件的优化及生物防治效果研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [26] 郭清华, 熊本涛, 陈少林. 粗糙脉孢菌产纤维素酶培养条件的优化[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 151-155.
- GUO Q H, XIONG B T, CHEN S L. Optimization of cellulase production conditions of *Neurospora* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(2): 151-155. (in Chinese)

(上接第 47 页)

- [31] 刘亚静, 孙玉军, 周来. 杉木径向生长动态对气候的响应[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 9-15.
- LIU Y J, SUN Y J, ZHOU L. Radial growth dynamics of *Cunninghamia lanceolata* and its response to meteorological factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 9-15. (in Chinese)
- [32] 李颖俊. 戴云山地区树木径向生长对气候变化的响应研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [33] SEVANTO S, SUNI T, PUMPANEN J, *et al.* Wintertime photosynthesis and water uptake in a boreal forest[J]. Tree Physiology, 2006, 26(6): 749-757.
- [34] TURCOTTE A, MORIN H, KRAUSE C, *et al.* The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1403-1409.
- [35] ZWEIFEL R, HÄSLER R. Frost-induced reversible shrinkage of bark of mature subalpine conifers[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(4): 213-222.
- [36] 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 等. 小兴安岭红松日径向变化及其对气象因子的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1635-1644.
- LI X H, LIU R P, MAO Z J, *et al.* Daily stem radial variation of *Pinus koraiensis* and its response to meteorological parameters in Xiaoxing'an Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1635-1644. (in Chinese)
- [37] 周博, 范泽鑫, 纪金华. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林木径向生长季节动态及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1699-1708.
- ZHOU B, FAN Z X, QI J H. Intra-annual radial growth of evergreen and deciduous tree species and their response to climatic factors in a montane moist evergreen broad-leaved forest in the Ailao Mountains, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1699-1708. (in Chinese)
- [38] ANDEREGG W R L, SCHWALM C, BIONDI F, *et al.* Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models[J]. Science, 2015, 349(6247): 528-532.
- [39] 雷静品, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区秭归县不同海拔马尾松径向生长对气候的响应[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 33-39.
- LEI J P, XIAO W F, HUANG Z L, *et al.* Responses of ring width of *Pinus massoniana* to the climate change at different elevations in Zigui county, three-gorge reservoir area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 33-39. (in Chinese)