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

将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应

孙雅楠 刘亚静 孙钊 罗蜜 张运根 孙玉军

Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China

Sun Yanan, Liu Yajing, Sun Zhao, Luo Mi, Zhang Yungen, Sun Yujun

引用本文:
孙雅楠, 刘亚静, 孙钊, 罗蜜, 张运根, 孙玉军. 将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2):18–27. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220373
Sun Yanan, Liu Yajing, Sun Zhao, Luo Mi, Zhang Yungen, Sun Yujun. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2):18–27. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220373

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220373

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

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

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

吉林北部山区长白落叶松林径向生长对气候干暖化的响应

Growth responses of *Larix olgensis* forests to climatic drying–warming trend in the northern mountainous region of Jilin Province, northeastern China

北京林业大学学报, 2018, 40(12): 18–26. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180333

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

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220373

将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应

孙雅楠 刘亚静 孙 钊 罗 蜜 张运根 孙玉军
（北京林业大学森林资源环境管理国家林业局重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】杉木是我国南方特有的用材树种，其具有良好的绿化效果，同时也具有较高的经济价值。本文主要对不同时间尺度上杉木径向生长动态及其与气候因子的关系展开研究，为科学经营研究区杉木提供参考依据。**【方法】**本研究利用径向生长测量仪对福建省将乐国有林场杉木进行了为期 4 年（2017 年 7 月—2021 年 6 月）的连续监测，对其径向生长量进行分析，确定生长季，同时进行偏相关分析及滑动相关分析探究温度、湿度、降水量等气候因子对杉木径向生长的影响。**【结果】**(1)杉木具有周期性的日径向改变，主要体现在 3 个阶段（第 1 个阶段是收缩、第 2 个阶段是恢复、第 3 个阶段是增长）；杉木径向变化的季节动态经历了低谷期、上升期和稳定期；杉木的径向变化年际间存在差异，但径增长的时间序列和累积变化趋势基本是一致的。(2)拟合并分析杉木累积径向生长曲线可以确定福建将乐杉木的生长季为每年 2—9 月。(3)平均相对湿度、降水量、最低温度和平均温度是主要的影响因子，且杉木净增量与降水量具有显著正相关的关系，温度在适宜杉木径向生长的范围内越高越利于生长，但高于或低于这个范围均会起抑制作用；滑动相关分析结果表明随着生长季时间的变化，相关系数呈现先增加后减少的趋势。**【结论】**杉木径向生长与相对湿度、降水量、温度等气候因子有密切联系，因此研究杉木的径向变化特征和对气候因子的响应，为更好地规划目标树种的生存策略提供了重要的技术路径和参考模型。

关键词：杉木；径向生长；生长季；气候因子
中图分类号：S791.27 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)02−0018−10
引文格式：孙雅楠，刘亚静，孙钊，等. 将乐国有林场杉木径向生长及其对气候的响应 [J]. 北京林业大学学报，2024，46(2)：18−27. Sun Yanan, Liu Yajing, Sun Zhao, et al. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 18−27.

Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and its response to climate in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province of eastern China

Sun Yanan Liu Yajing Sun Zhao Luo Mi Zhang Yungen Sun Yujun
(State Forestry & Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Objective**] *Cunninghamia lanceolata* is a unique timber species in southern China, which has good greening effect and also high economic value. In this article, the relationship between radial growth dynamics of *C. lanceolata* and climatic factors was investigated at different time scales to provide a basis for scientific management of *C. lanceolata* in the study area. [**Method**] In this study, the radial growth of *C. lanceolata* trees was continuously monitored at the Jiangle State owned Forest Farm in Fujian Province of eastern China for 4 years (July 2017−June 2021) using a radial growth meter to analyze their radial growth and determine the growing seasons, while partial and sliding correlation analyses were conducted to investigate the effects of climate factors, such as temperature, humidity, and precipitation on *C. lanceolata*

收稿日期: 2022−09−13 **修回日期:** 2022−11−07
基金项目: 林业科学技术推广项目（[2019]06）。
第一作者: 孙雅楠。主要研究方向：森林生长收获与模型模拟。Email: 923861620@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 孙玉军，教授。主要研究方向：森林资源监测与评价。Email: sunyj@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

radial extension. [**Result**] (1) *C. lanceolata* had periodic daily radial changes, which were mainly reflected in three stages, the first stage was contraction, the second stage was recovery, and the third stage was growth; the seasonal dynamics of radial changes in *C. lanceolata* underwent a trough period, a rise period and a stable period; there were interannual differences in radial changes in *C. lanceolata*, but the time series of diameter growth and cumulative change trends were basically the same. (2) The cumulative radial growth curves of *C. lanceolata* were combined to determine the growing season of *C. lanceolata* in Jiangle County, Fujian Province of eastern China, from February to September in each year. (3) The average relative humidity, precipitation, minimum temperature and average temperature were the main influencing factors, and the net increase of *C. lanceolata* had a significant positive correlation with precipitation. The sliding correlation analysis showed that the correlation coefficient increased and then decreased with the change of growing season time. [**Conclusion**] The radial growth of *C. lanceolata* is closely related to climate factors, such as relative humidity, precipitation and temperature, therefore, studying the radial variation characteristics of *C. lanceolata* and its response to climatic factors provides an important technical pathway and reference model for better planning of survival strategies for the target tree species.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; radial growth; growth season; climate factor

气候因子对树木的生长起着至关重要的作用[1−2]，近年来，全球气候变化日益明显[3]，对于树木径向生长及其对气候因子的响应逐渐成为研究热点，研究树木的生长机制可以为合理制定森林经营管理措施以应对气候变化趋势提供参考[4−5]。

对于气候因子与树木径向生长关系的研究多数以年轮宽度为研究对象[6−7]，而此研究方法的时间分辨率较低[8]。在不对树木进行破坏的前提下，径向生长测量仪可以对树木的径向生长进行直观的检测。该方法具有以下优势：时间分辨率高，常用的径向生长测量仪的时间分辨率可至分钟级；可以连续测量同一位置的周长或者半径变化，而不会对树木本身造成破坏；设备性能较好、易操作，安装后可以长期监测[9]。

大量学者利用径向生长仪对树木径向生长对气候因子的响应展开研究。夏敬清等[10]利用树木径向生长监测仪对 8 棵青海云杉（*Picea crassifolia*）的径向生长和环境因子进行了连续监测研究，发现青海云杉在日平均气温超过 5.5 ℃ 时开始径向生长，生长季末期降水量对生长结束时间有较大影响，且干旱强烈抑制了研究区青海云杉径向生长量。韦小练等[11]对落叶树种多花白头树（*Garuga floribunda*）的径向生长季通过高精度生长仪进行监测，最终得出与其生长呈正相关的因素有降水量和相对湿度，与其生长呈显著正相关的因素是日最低气温、20 cm 深度的土壤含水量和温度，与其生长呈负相关的因素有日最高气温、最大风速以及水汽压亏缺。吴丽杰等[12]对落叶树种苦楝（*Melia azedarach*）的树干径向变化通过高精度树木生长仪进行研究，最终得出在不同的年际其径向生长从开始、持续以及结束存在比较明显的差异，与其生长呈正相关的因素有相对湿度以及降水量，与其生长呈负相关的因素有水汽压亏缺、光合有效辐射和风速，其中对其径向生长起着至关重要的因素就是水分。黄雅奇[13]研究了中部亚热带杉木（*Cunninghamia lanceolata*）林的径向生长与气候因子的关系，杉木的径向生长量变化受气候因子（降水量、温度和相对湿度）显著影响，其中降水量和温度的作用更大，温度是影响杉木全年径向生长的最敏感因素。在春、秋和冬季，温度对径向生长有促进作用，而在夏季，由于气温较高，会抑制径向生长。以上研究均证明气象因子是树木径向生长的重要影响因素，且径向生长仪可以在不同地区对不同树种径向变化进行监测。刘亚静等[14]对不同林龄杉木径向变化对气象因子的响应进行研究，结果表明径向生长速率 > 4 μm/d时生长季开始，通过径向生长测量仪进行跟踪监测获取数据，拟合径向生长曲线，可推断出研究区样木生长季的开始时期与结束时期，可以为分析树木径向生长与气候因子间的关系奠定基础。

径向生长测量仪在测量树木径向生长与研究气候因子影响方面有着巨大优势，故可以通过该设备于实验林场区域分析杉木的径向生长状况与气候因子间的关系[15]，并且该设备可以对不同气候条件下树木的生长状况进行监测，对监测结果展开分析，可以探究研究区所研究树种的经营管理模式。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

将乐国有林场位于福建省三明市将乐县（117°05′ ~ 117°40′E、26°26′ ~ 27°04′N），坐落在三明

市西北部，位于金溪河的中下游、武夷山的东南部地区。将乐县属亚热带季风气候区，年均温在 19.6 ℃左右，年平均降水量 1 770.4 mm，年无霜期 273 d，森林覆盖率达 79.98%[16]。该地区四季分明，夏季酷暑天气较少，冬季低温持续较短，雨热同期，干湿明显（图 1），对树木生长比较有利。研究区地形复杂，有耸立的山岭、绵延的山丘和短而陡的斜坡，中部略为平坦，地势较低，东南部及西北部地势相对较高[17]。该地是杉木的主产区。

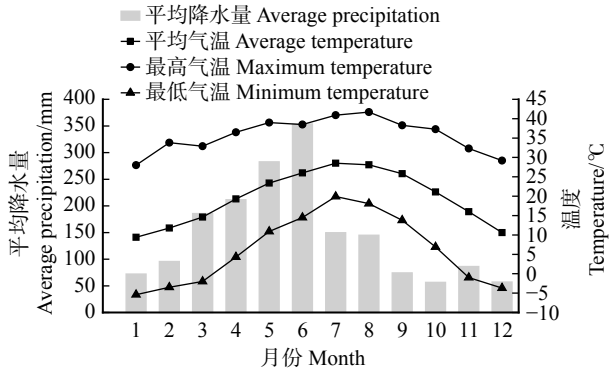


图 1 将乐县 2000—2020 年的月最高温度、月平均温度、月最低温度与月平均降水量

Fig. 1 Monthly maximum temperature, monthly mean temperature, monthly minimum temperature and monthly mean precipitation in Jiangle County of Fujian Province from 2000 to 2020

杉木是一种优质速生针叶树种，在亚热带地区广泛栽培，具有很高的经济价值。根据第 9 次全国森林资源调查的结果可知，杉木人工林的总面积约达 987 亿 m^2，为全国人工乔木林总面积的 1/4，其总蓄积量高达 7.55 亿 m^3，为全国人工乔木林总蓄积量的 1/3[18]。

1.2 杉木径向生长量及气象数据收集

选取 3 块面积为 20 m × 30 m 的标准固定杉木样地作为研究对象。为减少样地不同基础条件的影响，尽量选择坡度、坡向和海拔相似位置设置样地。标准地块中每棵树的平均胸高直径和平均树高是选择标准木的重要指标，经过对比选择了树干笔直、健康无虫的 3 株杉木，测量其胸径计算平均值在 17.2 cm 左右，树高为 14 m 左右。本研究中，数据的收集时间为 2017 年 7 月—2021 年 6 月，采用 DRL26 树木径向生长测量仪对杉木的径向生长量变化进行监测。径向生长仪的分辨率较高，能够达到 4 μm 的精度，在不同气候条件差异下为研究树木的生长提供了有效数据[14]。生长仪安装在杉木胸高处，在安装前需要提前去除距离地面 1.3 m 的树高部位（胸高处）的树皮，所剥树皮尽量是在表层松动干枯的，在安装探头和金属线后，将每次记录间隔时间设置为 1 小时，每日获取 24 个数据。假设树干为圆形的横断面，文中径向变化均将周长转换为半径[19]。

气象数据来自于位于 26°44′N，117°28′E 的将乐县气象站，所需的气候因子包括降水量（P）、平均相对湿度（RH_{mean}）、最小相对湿度（RH_{min}）、最低温度（T_{min}）、最高温度（T_{max}）、平均温度（T_{mean}）等。

1.3 数据处理方法

1.3.1 杉木生长拟合

Gompertz 函数与其他“S”函数相比更适合于模拟生长季的径向生长，因此该函数也被许多研究人员广泛使用。树木的径向数据利用树木径向生长测量仪来获取，通过最大值的方法确定被累积起来的径向增长，得到累积的径向增长量，并且对该数值进行拟合[20−22]，然后进行求导可以得到杉木特定时间的生长速率，并根据生长速率的值确定生长季。

本研究采用 Gompertz 生长模型拟合杉木径向变化累积生长量。

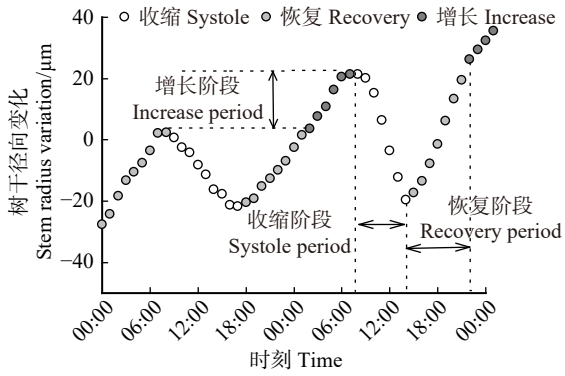
$$Y = A \times \exp\{-\exp(\beta - kt)\} \quad (1)$$

式中：Y 为径向变化累积生长量；t 为日序；A 为生长累积量的上渐近线；β 为位置参数；k为变化率参数，exp 为以自然常数 e 为底数的指数函数。

生长速率大于仪器测量精度（4 μm）的时段为杉木生长季并将其用于生长−气候二者关系分析[23]。参数估计采用最小二乘法。

1.3.2 日径向生长量的提取

从每日清晨开始，杉木径向生长的昼夜循环模式有 3 个阶段。第 1 阶段是收缩阶段，在此期间，前一阶段样木的半径峰值减少到目前的低谷值；第 2 阶段是恢复阶段，在此期间，样木半径从目前的低谷值增加到前一阶段的峰值；第 3 阶段是增长阶段，在此期间，样木半径超过了上一阶段的峰值并产生了新的峰值[24]。然后，如图 2 所示，杉木开始新的循



引自文献 [15]。Cited from reference [15].

图 2 杉木径向变化日循环示意图

Fig. 2 Schematic diagram of daily radial variation cycle of *Cunninghamia lanceolata*

环[15]。增长阶段的生长包括因细胞吸收水分而产生的径向扩张和因形成新细胞而产生的径向生长，每天的净增量即为此 3 阶段产生的生长量[25]。

有 3 种进行提取径向生长量的方法：周期法、日值平均法、最大值法。国内外研究学者多次研究表明以上 3 种方法在研究结果方面具有良好的相似性[26]。本研究中采用了最大值法，用本阶段的半径峰值减去前一阶段的半径峰值，得到一个变化值，如果此变化值为正，则记录径向增长，如果为负，则记录没有径向增长即径向变化为零。

根据生长仪原始数据可以得到所监测杉木 4 年间的径向变化过程，得到了连续 4 年的径向序列。杉木的季节变化特征及年际间差异可以用 4 年所监测到的径向变化序列来描述。

1.3.3　气象数据处理

将通过最大值法所获取的研究期内的日径向生长量数据的累加值作为原始数据进行模型拟合。利用 SPSS26 软件对其进行 Pearson 偏相关分析[27]，来研究杉木树干日径向生长量与对应的日值气象因子的关系。滑动相关分析可以观察到特定时间点或时间窗口间的波动性[28]，更能体现气候因子的时变特性，用杉木生长季数据进行滑动相关分析可以探究杉木径增量与气象因子随时间的变化的关系。

2　结果与分析

2.1　气象因子特征分析

根据图 3 分析 2018、2019、2020 年 3 年气象因子变化规律，3 年的气温变化较为相似，月平均气温、月最高气温、月最低气温变化曲线基本一致，2018 年 1 月、2 月平均温度最低，但是 3—5 月升温较快，均为 3 年中同月份均温最高；3 年中最高温为 2019 年 8 月，达到了 40 ℃；3 年中的最低温为 −3.5 ℃，出现时间为 2018 年 2 月。3 年的每月平均降水量表现出一定的差异，3 年中月份最高降水量及最低降水量均出现在 2019 年，分别为 7 月和 9 月。2018 年的 1 月及 11 月为 3 年中同月份降水量最高，但是 2—7 月降水量均为 3 年中最低。2019 年的 2—7 月平均降水量均在 200 mm 以上，6—7 月达到 400 mm 以上，7 月达到 3 年峰值为 415.1 mm，但同年 8 月份，降水量骤降，9 月份达到 3 年最低值 2.4 mm。2018 年的降水量最高值月份为 6 月，2019 年为 7 月，均在夏季，在 2020 年的春季是降水量最多的季节，月份为 3 月，为 329 mm。2020 年与其他两个年份相差较大的两个月为 9 月和 10 月，虽然这两个月份相邻，但 9 月降水量为 3 年中同月份最高，10 月降水量为 3 年中同月份最低。

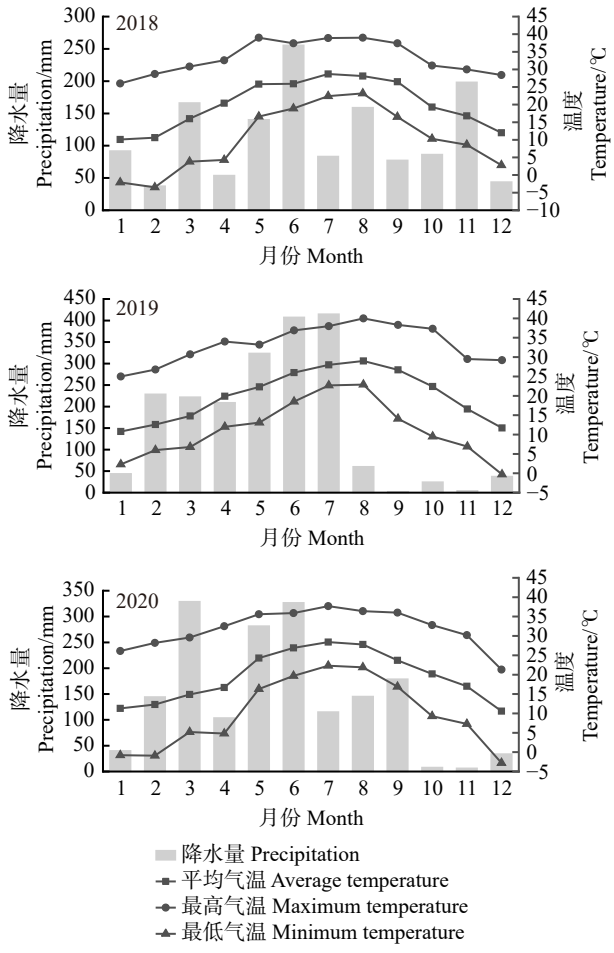


图 3　研究区 2018、2019、2020 年气候特征

Fig. 3　Climate characteristics of the study area in 2018, 2019 and 2020

2.2　杉木径向变化特征

2.2.1　径向变化的日循环模式

杉木径向变化的月平均日循环模式见图 4，可以看出其季节变化动态为春季大幅度升高，夏季持续上升，秋季稳定变化，冬季逐渐下降。各月份之间的振幅具有明显的季节性，日振幅最高值出现在 7—8 月，最低值出现在 12 月。日振幅在各个季节有明显差异，但日循环的周期性在各个季节较为相似，13:00—16:00 是出现日最小值的主要时间；日最大值出现时间较为分散，主要分布在 06:00 前。

2.2.2　径向变化的季节动态

从 2017 年 7 月—2021 年 6 月的 4 年期间，所研究的 3 株样树的径向生长动态数据是通过树木径向生长测量仪所得，根据生长仪原始数据可以得到所监测杉木 4 年间的径向变化过程，得到了连续 4 年的径向序列。杉木的季节变化特征可以用 4 年所监测到的径向变化序列来描述。在图 5 中，2018 年 7 月底对应的变化趋势出现了中断情况，原因是该时间研究人员在径向生长仪中收集测量数据时，为了避免生长仪铝片周长不足对树木有所损伤并影响树木生长，所以调整了铝片的长度。通过径向生

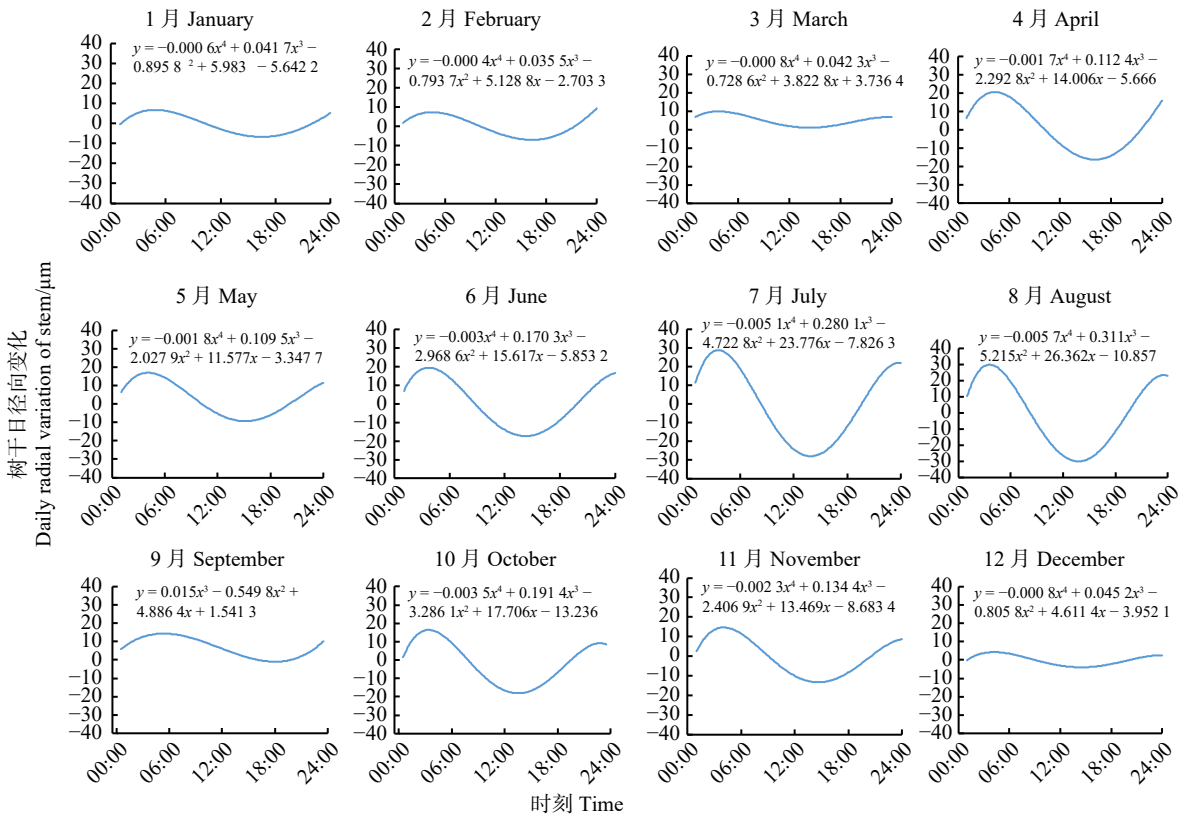


图 4 月平均日径向变化(2020 年)

Fig. 4 Monthly mean daily radial variation (2020)

长测量仪得到了连续 4 年的径向序列(图 5a)。

杉木的季节变化特征可以用 4 年所监测到的径向变化序列来描述(如图 5b 所示),由图可知,杉木在冬季(1—2 月)径向变化和振幅较小,春季至夏季(3—7 月)变化幅度较大,且呈波形的变化趋势。结合图 5a 及图 5b 可得,综合对比所研究的 4 年径向变化模式,发现在季节尺度上相对稳定,冬季和早春的累积变化降低,持续到 3 月份上升明显且速率较快,到 11 月份开始,增长变得稳定,第 2 年春天再次明显上升。虽然样木具有各不相同的径向变化,但它们的变化趋势都是低谷、上升和稳定期这 3 个阶段。树木在上升期开始有径向生长的动态,而低谷期则相反,径向生长在进入稳定期时结束。

2.2.3 径向变化的年际间差异

由图 5 可知,尽管 4 年间的杉木径向变化模式在年内短时间尺度上较为相似,但是年际间略有差异,在增长量普遍较大的 6 月,19 年的增长速率较大,明显高于其他年份;2018 年在 7 月底趋于平缓,但其他年份出现下降趋势;杉木的径向累积值在 2018 年 5 月下降明显,2019 年无明显变化趋势,2020 年却有上升趋势。4 年的高峰值均在 6—8 月,20 年的变化程度最大。径增长的时间序列和累积变化趋势基本是一致的。

2.3 杉木径向生长拟合

使用 Gompertz 模型对 2018、2019、2020 年(研究时间内完整的 3 年)3 株杉木 1—12 月数据进行了拟合,拟合结果如图 6 所示,样木平均值的 R^2 均达到了 99% 以上。说明 Gompertz 函数在拟合效果上比较好。

由图 6 可见,月平均半径生长量在 2018 年为 1.95 mm,2019 年为 1.66 mm,2020 年为 1.80 mm。根据生长速率 > 4 μm/d 确定生长期。2018 年的平均生长期有 250 d(2 月 19 日—10 月 27 日),在 5 月 21 日其生长速率值是最大的;2019 年的平均生长期有 188 d(2 月 26 日—8 月 26 日),在 5 月 21 日其生长速率值是最大的;2020 年的平均生长期有 206 d(2 月 10 日—8 月 29 日),在 4 月 29 日其生长速率值是最大的。所以结合 3 年数据,确定杉木生长季为 2—9 月,这与刘亚静等[14]对福建省不同林龄杉木径向生长动态研究所得生长季一致。

2.4 径向生长与气候因子的关系

本部分选用 2018 年径增量与气候因子数据进行分析。

为了只分析所探究的变量,就需要排除其他变量的影响,偏相关性分析可以达到该目的,因此,探究了生长季内杉木日径向生长量与各个气象因子的

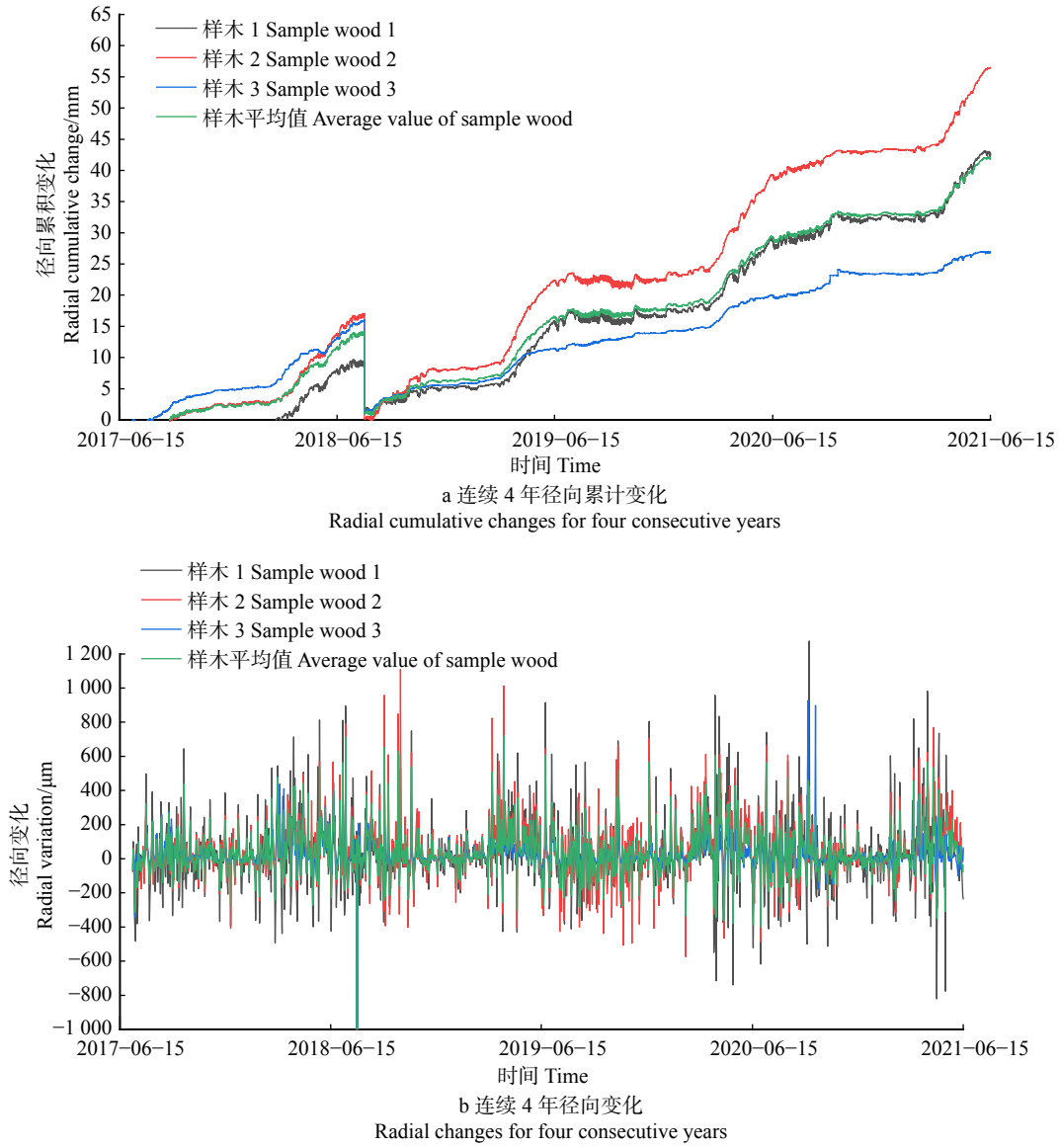


图 5　杉木年尺度径向变化动态

Fig. 5　Annual scale radial variation dynamics of *Cunninghamia lanceolata*

偏相关性，结果如表 1 所示：对杉木径向生长产生影响的主要因素是降水和最低温度以及平均相对湿度温度，径向生长量随着温度在适宜范围内的升高而加快，超出适宜温度会起抑制作用，且与降水具有明显的正相关关系。

用杉木生长季数据对径增量与气象因子随时间变化规律进行滑动相关分析，将移动窗口设置为 21 d，每隔 1 d 滑动 1 次，如图 7 所示，随着生长季时间的变化，系数先增加后减少。和径增量呈明显正相关的是 3、4、6、9、10 月这 5 个月份的降水量，相对湿度促进径向生长，而不同温度因子与径向生长的相关性不同，最低温升高在多数月份促进杉木径向生长，最高温度升高除在 3 月外均抑制杉木径向生长，这应该和杉木径向生长最适宜温度有关。

3　讨论与结论

研究发现，杉木径向生长量日变化为抛物线型，表现为白天收缩、晚上扩张。出现这种现象的原因是树木在日间会因蒸腾作用而发生径向收缩，而在下午则会因根系吸收水分而发生径向膨胀[19]，从傍晚到第 2 天清晨开始径向生长，以此不断循环，形成每日径向周期变化。这与王艺涵等[29]对桉树（*Eucalyptus robusta*）树干径向生长量日变化及其对环境因子的响应研究一致。但敬文茂等[30]对祁连山排露沟流域青海云杉径向生长对气象因子的响应研究发现，青海云杉每日径向生长最大值出现在 10:00—12:00 之间，每日最小值出现在 21:00—21:30 之间。这可能是因为研究区地理位置、气候不同或树种自身原因导致，才出现了树木径向生长日最大、

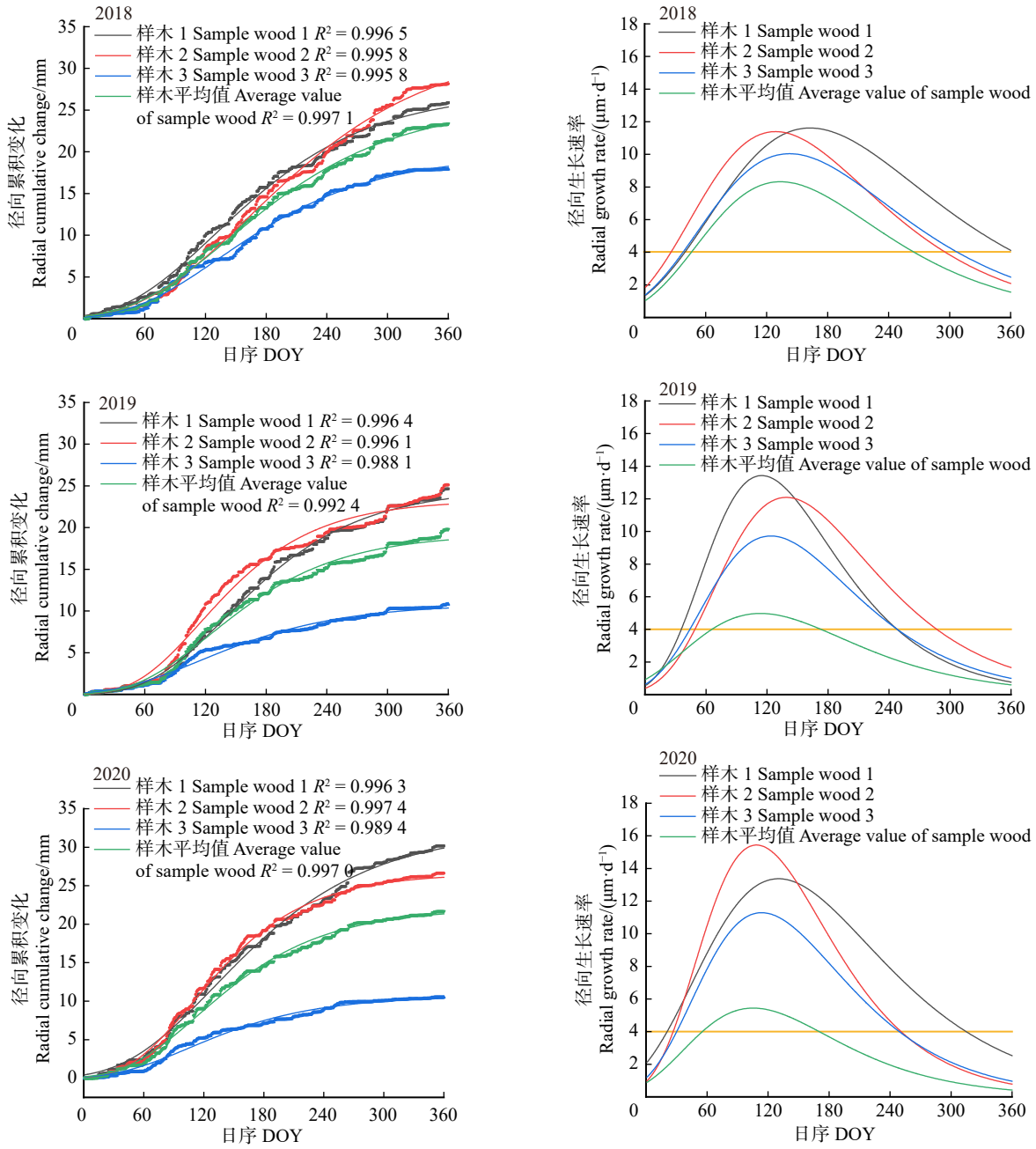


图 6 2018—2020 年杉木径向生长累积拟合及径向生长速率

Fig. 6 Cumulative fitting and radial growth rate of *Cunninghamia lanceolata* from 2018 to 2020

表 1 杉木生长季日径向变化与气象因子的 Pearson 偏相关性

Tab. 1 Pearson partial correlations between daily radial variation and meteorological factors in *Cunninghamia lanceolata* growing season

项目 Item	最高温度 Maximum temperature	最低温度 Minimum temperature	平均温度 Average temperature	降水量 Precipitation	平均相对湿度 Average relative humidity	最小相对湿度 Minimum relative humidity
偏相关性系数 Partial correlation coefficient	−0.004	−0.132*	0.11*	0.353**	0.139*	0.091

注：*表示 $P < 0.05$，**表示 $P < 0.01$。Notes: * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$.

最小值出现时间不一致。

本研究杉木径向生长量月变化规律与孟盛旺等[19]在江西中部对杉木径向生长量季节变化规律研究结论相一致。杉木季节变化动态为春季大幅度升高，夏季持续上升，秋季稳定变化，冬季低速下降，最低日振幅出现时间有差异，江西中部杉木在 1 月最低，而本研究发现日振幅最低月份为 12 月，这有可能是由于当地气候环境的影响，但研究表明最高日振幅均在夏季出现，较为统一。

杉木在 2 月初径向生长加快明显，基本稳定是

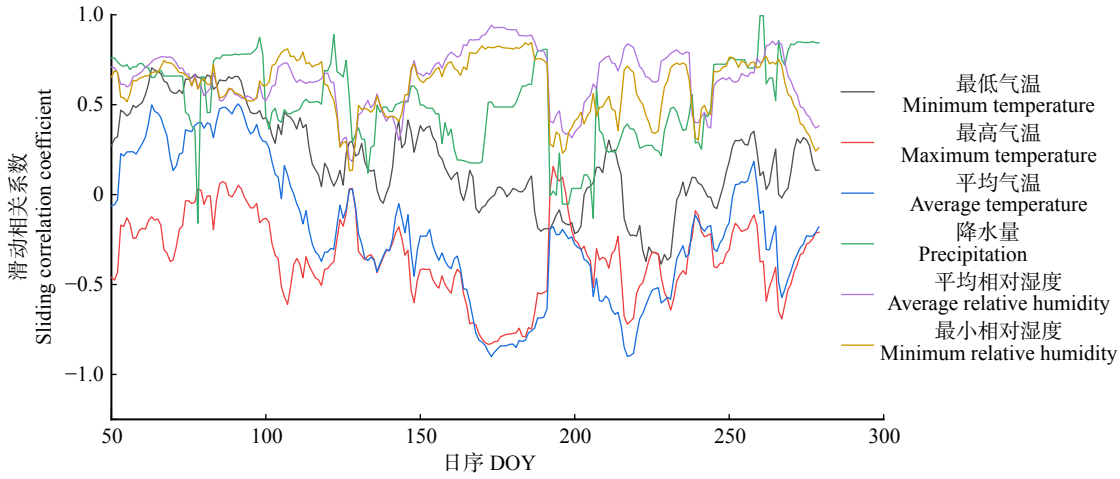


图 7　径向生长与环境之间的动态相关性（21 d 窗口期）

Fig. 7　Dynamic correlation between radial growth and environment (21 d window period)

在 11 月，杉木在 3—8 月的径向生长量占全年总量的 70% 且 4 月径向生长量最大。使用 Gompertz 模型对 2018、2019、2020 年（研究时间内完整的 3 年）杉木 1—12 月数据进行了拟合，确定杉木生长季为 2—9 月，与 Liu 等[20]研究的黄山松（*Pinus taiwanensis*）的生长季相似，南方树种黄山松生长季为 3—10 月。

所研究的气候因子中相对湿度在整个生长季与径向生长的相关系数最大，呈显著正相关，在 5 月达到最高。Krepkowski 等[31]研究指出增加相对湿度，对径向生长有促进作用，细胞扩张过程对水分较为敏感，水分充足可以促进细胞扩张[32]。在本研究中，降水量与径向生长显著正相关且相关系数较大，然而各个季节的相关性具有一定的差异。这与吴丽杰等[12]利用高精度树木生长仪研究落叶树种苦楝（*Melia azedarach*）树干的径向变化的结果相似，他们发现木质部的生长与降水呈正相关，对树木径向生长起着限制因素的就是相对湿度以及降水，其中生长初期的降水量尤为重要。

2018 和 2019 两年生长期长度差别较大，所监测杉木 2018 年 10 月 27 日才停止生长，生长期共 250 d，然而 2019 年 8 月 26 日就已不再生长，生长期共 188 d，分析可知，2018 年降水量相对较高，且 2018 年 9 月及 10 月降水量高于 2019 年 8 月，2019 级 9 月降水量几乎为 0，影响了杉木径向生长。在本研究生长季的大部分时间里，降水促进杉木的径向生长，而 7 月降水起到相反作用。说明虽然降水量与杉木径向生长显著正相关，但是过高也会起到相反的抑制作用。

在一年中温度对径向生长也存在不同的影响，最低温度是一个重要的影响因素，在生长率最高的 5 月促进径向生长，但是最高温度几乎在整个生长季都会抑制杉木的径向生长。这和孟盛旺等[19]对江西中部杉木径向生长动态的研究所得结果一致，他们的研究指出在充沛的降雨、较低的气温下，树木的径向增长相对较高，日最高气温和平均气温对径向增长表现为抑制作用。高温的抑制作用的主要原因是其增加了蒸腾作用和呼吸作用，从而增加了树干的收缩程度。

5 月是杉木生长速率最大的时期，也就是径向生长最快的时期。光合作用能够产生碳水化合物，将能量释放，供杉木径向生长所需，温度的升高可能会延长树木的生长时间，助于光合作用，并使得树木生长速度加快[33]。但温度的促进作用在最佳范围内是有效的，超出这个范围或低于这个范围均会产生抑制作用[34]，这可能与最适宜杉木生长的温度有关[35]。相对湿度对杉木径向生长显著正相关，可以起到促进作用[36]，但是在 7 月较高的温度导致杉木生长环境及内部含水率下降，虽然降水量较多，但无法被充分利用，最终降低了 7 月的降水与杉木径向生长的相关性。张辉等[37]利用杉木树轮自回归年表（ARS）对杉木径向生长和气候因子关系进行分析，结果表明降水和温度对杉木径向生长影响显著。树木生长和气候的关系较为复杂，需要利用多种手段进一步探究[38−40]。本研究基于径向生长仪对杉木 2017 年 7 月—2021 年 6 月 4 年的径向变化、径向生长、以及径向生长对气候响应 3 方面进行了研究。初步确定了杉木日变化、季节变化及年际间变化差异，同时确定了生长季以及对生长−气候相关性做了一定的分析。研究结果在一定程度上为福建将乐地区杉木的经营管理提供科学依据。

参　考　文　献

［1］ 孙晓能. 关帝山青扦径向生长与气候因子的关系 [D]. 昆明: 云南大学, 2020.

Sun X N. Radial growth responses of *Picea wilsonii* to climatic variables in Mt. Guandi, China[D]. Kunming: Yunnan University, 2020.

[2] 梁鹏鸿. 我国高纬度、高海拔树木径向生长对气候变化的响应及其影响机制 [J]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Liang P H. The mechanism of tree radial growth response to climate change at high latitude and alpine treeline areas[J]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[3] 杨琳. 兴安落叶松林土壤温室气体通量特征及其影响因子研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
Yang L. Characteristics and environmental controllers of soil CO_2 and CH_4 fluxes of the Xing'an larch (*Larix gmelinii*) forest[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.

[4] 国颖. 气候变化背景下银杏分布预测及表型性状的环境响应机制研究 [J]. 南京: 南京林业大学, 2021.
Guo Y. Prediction of ginkgo distribution and research on environmental response mechanism of phenotypic traits under the climate change[J]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.

[5] 樊翔. 露天矿区重建植被动态变化对气候因子的响应研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2021.
Fan X. Re-established vegetation response to climate factors on surface mined land[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[6] 乔晶晶, 王童, 潘磊, 等. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2231−2240.
Qiao J J, Wang T, Pan L, et al. Response of radial gro growth to climate change in wth to climate change in *Pinus massoniana* at different altitudes and slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2231−2240.

[7] 徐贺年, 王江林, 彭小梅, 等. 青藏高原东北部祁连圆柏径向生长对不同类型干旱的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2097−2104.
Xu H N, Wang J L, Peng X M, et al. Responses of radial growth of *Juniperus przewalskii* to different droughts over the northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2097−2104.

[8] van der Werf G W, Sass-Klaassen U G W, Mohren G M J. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands[J]. Dendrochronologia, 2007, 25(2): 103−112.

[9] 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.
Zhang J Z. Cambial phenology and intra-annual radial growth dynamics of conifers over the Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[10] 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.
Xia J Q, Gou X H, Wang L L, et al. Stem radial growth of *Picea crassifolia* in response to climatic factors in the western Qilian Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3585−3593.

[11] 韦小练, 范泽鑫, Kaewmano Arisa, 等. 热带季节雨林多花白头树年内径向生长动态及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3567−3575.
Wei X L, Fan Z X, Arisa K, et al. Intra-annual radial growth of *Garuga floribunda* in tropical seasonal rain forest and its response to environmental factors in Xishuangbanna, Southwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3567−3575.

[12] 吴丽杰, Arisa Kaewmano, 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.

[13] 黄雅奇. 中亚热带杉木人工林径向生长及其与气象因子的关系 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
Huang Y Q. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* plantation in the middle sub zone and its relationship with meteorological factors[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.

[14] 刘亚静, 周来, 张博, 等. 不同林龄杉木径向变化及其对气象因子的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 135−144.
Liu Y J, Zhou L, Zhang B, et al. Radial variation of *Cunninghamia lanceolata* in different aged forests and itsresponse to meteorological factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 45(2): 135−144.

[15] 刘亚静, 孙玉军, 周来. 杉木径向生长动态对气侯的响应[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.

[16] 吴明钦. 福建杉木人工林树冠结构研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Wu M Q. A study on crown structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[17] 马浩然. 基于多层次分割的遥感影像面向对象森林分类 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Ma H R. Object-based remote sensing image classification of forest based on multi-level segmentation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[18] 王梦娟, 黄志群, 张冰冰, 等. 不同林龄杉木人工林土壤硝化和反硝化作用[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 18−24.
Wang M J, Huang Z Q, Zhang B B, et al. Soil nitrification and denitrification in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 18−24.

[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] 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]. Forest, 2018, 9(7): 387.

[21] 张毅, 顾凤岐. 残差自回归模型在人工林红松树高生长规律预测中的应用[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6): 76−79.
Zhang Y, Gu F Q. Application of residual autoregressive model in the prediction of tree height growth law of Korean pine plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(6): 76−79.

[22] 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.
Liu S L, Yang B G, Yao J F, et al. Study on stem radial growth of *Castanopsis hystrix* in Guangxi[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 82−90.

[23] 刘亚静. 杉木径向生长及其对气候因子的响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Liu Y J. Radial growth of *Cunninghamia lanceolata* in different forest ages and its response to climatic factors[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[24] 张月莹, 周志勇. 树木径向生长测量仪的应用研究[J]. 林业资源管理, 2019(1): 129−135.
Zhang Y Y, Zhou Z Y. Progress in the application of dendrometer[J]. Forest Resources Management, 2019(1): 129−135.

[25] 郑勤莹. 帽儿山不同坡位水曲柳和红松径向生长及其对气候变化的响应 [J]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
Zheng Q Y. Radial growth of *Fraxinus mandshurica* and *Pinus koraiensis* on different slopes of Maoershan and their response to climate change[J]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.

[26] 牛豪阁. 祁连山东部三种针叶树径向生长动态对气候的响应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
Niu G H. Intra-annual stem radial growth dynamics of three coniferous species in response to climate in the eastern Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.

[27] Nikolay N, Zinaida, Alexandr M. Effect of meteorological factors on the radial growth of pine latewood in northern taiga[J]. Folia Forestalia Polonica, 2022, 64(1): 7−14.

[28] 贾嘉莹, 况立群, 熊风光, 等. 基于持久同调的复杂脑网络动态演化分析[J]. 波谱学杂志, 2021, 38(1): 80−91.
Jia J Y, Kuang L Q, Xiong F G, et al. Analysis of dynamic evolution of complex brain networks based on persistent homology[J]. Journal of Spectroscopy, 2021, 38(1): 80−91.

[29] 王艺涵, 赵从举, 周雯雯, 等. 桉树树干径向生长日变化及其对环境因子的响应[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2017, 37(6): 31−36.
Wang Y H, Zhao C J, Zhou W W, et al. Diurnal variation in stem radial growth of *Eucalyptus robusta* and its response to environmental factors[J]. Journal of Tianjing Normal University (Natural Science Edition), 2017, 37(6): 31−36.

[30] 敬文茂, 赵维俊, 马剑, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉径向生长对气象因子的 32 响应[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(2): 111−117.
Jing W M, Zhao W J, Ma J, et al. The growth in stem diameter of *Picea crassifolia* and its response to meteorological factors in Pailugou Basin, Qilian Mountain[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(2): 111−117.

[31] Krepkowski J, Brauning A, Gebrekirstos A, et al. Cambial growth dynamics and climatic control of different tree life forms in tropical mountain forest in Ethiopia[J]. Trees, 2011, 25(1): 59−70.

[32] 张雨, 苏旭, 刘玉萍, 等. 沙鞭 PvDREB 基因克隆与表达特异性分析[J]. 西北植物学报, 2023, 43(2): 202−210.
Zhang Y, Su X, Liu Y P, et al. Cloning and expression characteristics of Pv DREB gene in *Psammochloa villosa* (Poaceae)[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43(2): 202−210.

[33] 李夏榕. 林分与气候因子对京郊道路林毛白杨径向生长的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
Li X R. Effect of stand factor and climate change on the radial growth of *Populus tomentosa* in road shelter forest in suburban, Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.

[34] 肖瑞晗. 寒温带兴安落叶松林生态系统氮转化及运移特征 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Xiao R H. Nitrogen transformation and transport characteristics of *Larix gmelini* forest ecosystem in cold-temperate area of Daxing'an Mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[35] Beedlow P A, Henry L E, Tingey D T, et al. The importance of seasonal temperature and moisture patterns on growth of douglasfir in western Oregon, USA[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 269(10): 174−185.

[36] Zhang Q, Lyu L X, Wang Y. Patterns of daily stem growth in different tree species in a warm-temperate forest in northern China[J]. Dendrochronologia, 2022, 72(1): 1436−1440.

[37] 张辉, 颜耀, 胡亚楠, 等. 基于树轮气候相关分析法的杉木径向生长与气候因子关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(1): 59−66.
Zhang H, Yan Y, Hu Y N, et al. Analysis on the relationship between radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and climatic factors based on tree-ring climate correlation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 49(1): 59−66.

[38] 马菁. 六盘山华北落叶松多时间尺度树干径向生长的环境响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Ma J. Environmental response of radial growth of *Larix principis-rupprechtii* trees at multiple time scales in Liupan Mountains[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[39] Svenja D, Roland P, Jorg L. Contrasting growth response of evergreen and deciduous arctic-alpine shrub species to climate variability[J]. Ecosphere, 2021, 12(8): 1−22.

[40] Shi J, Cookke R, Li J, et al. Unprecedented January julywarming recorded in a 178-year tree ring width chronology in the Dabie Mountains, southeastern China[J]. Palaeogeography Palaeo Climatology Palaeoecology, 2013, 381/382: 92−97.

（责任编辑　范　娟
责任编委　孟　平）