

李金宽, 彭剑峰, 彭猛, 等. 过渡带马尾松早晚材径向生长对气温突变的响应——以河南省鸡公山国家级自然保护区为例 [J]. 地理科学, 2025, 45(4): 899-909. [Li Jinkuan, Peng Jianfeng, Peng Meng et al. Response of growth in early-wood and late-wood of *Pinus massoniana* to abrupt warming in the north-south transition zone: A case of the Jigong Mountain National Nature Reserve in Henan. Geographical Science, 2025, 45(4): 899-909.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20221451; cstr: 32176.14.geoscience.20221451

过渡带马尾松早晚材径向生长对气温突变的响应

——以河南省鸡公山国家级自然保护区为例

李金宽^{1,2}, 彭剑峰^{1,2}, 彭猛¹, 韦晓旭¹, 李轩¹, 崔佳月¹

(1. 河南大学地理科学与工学部地理科学学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 河南 开封 475004)

摘要: 本文运用河南省鸡公山马尾松 (*Pinus massoniana*) 全轮、早材与晚材径向生长数据, 分析其对气候变化的响应及其稳定性。结果表明: 鸡公山马尾松的全轮、早材与晚材年表均包含较多的气候信息, 且全轮、早材与晚材年表具有较高的一致性。但全轮、早材与晚材年表也存在一定的差异, 全轮与早材主要受上年生长季前期和当年生长季前期和末期的气温和降水的影响, 其中当年春季的水热组合是影响该地马尾松径向生长的主要限制因子; 晚材主要受上年秋季降水和当年生长季前期水热组合的影响。该地区在 1994 年发生气温突变后, 全轮与早材的年轮指数增长明显, 晚材的年轮指数变化不明显; 随着气温的升高, 全轮与早材对气温的响应增强, 晚材对气温的响应变化不明显。通过分析鸡公山马尾松年轮的不同指标, 可以较为深刻理解马尾松径向生长对气温变化的响应变化, 为大别山西部地区森林更新、保护与管理提供科学依据。

关键词: 鸡公山; 马尾松; 年轮宽度; 气候变化响应; 气温突变

中图分类号: P936 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2025)04-0899-11

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 6 次报告指出: 人类活动是全球升温的主要驱动因素, 随着气候变暖, 极端气候的强度和频率都有所增加^[1], 对人类及自然生态系统造成极大的影响^[2-3], 因此气候变化研究越来越受到社会关注。树木的生长与环境密切相关, 年轮的宽窄变化可以有效地记录各种环境因素, 且具备对气候环境变化响应敏感、分辨率高、定年准确、连续性强、地域分布广泛等特点, 非常适合于过去气候变化研究^[4-5]。

目前, 国内外已经开展的树轮学研究中, 以树轮宽度研究为主, 且大多为全轮的研究, 而相对于全轮, 早材和晚材具有更高的时间分辨率, 可能会包含更多、更细微的气候信息^[6]。例如, 阿尔泰山西伯利亚云杉(*Picea obovata*)早材比全轮与晚材对气候的响应更加敏感^[7]。浑善达克沙地中白杉(*Picea meyeri*)早材与晚材比全轮对气候的响应更加敏感, 且全轮与早材所包含的气候信息相似^[8]; 三清山黄山松(*Pinus taiwanensis*)的全轮、早材与晚材对气候的响应高度一致, 从早材与晚材中不能提取出与全轮不同或更强的气候信号^[9]; 庐山日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)和川西南柳杉(*Cryptomeria fortunei*)早材与晚材径向生长对气温和降水的响应差异比较大, 早材比晚材对气候的响应更加敏感^[10-11]。

收稿日期: 2023-10-11; **修订日期:** 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077417, 41671042)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42077417, 41671042).]

作者简介: 李金宽(1998—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要研究方向为树木年轮生态学与树木年轮气候学、环境变化。E-mail: 104753210170@henu.edu.cn

通信作者: 彭剑峰。E-mail: jfpeng@vip.henu.edu.cn

气候变化对树木的影响是现实且复杂的,当气温升高,树木生长与气候因子间呈现出一种不稳定的非线性关系^[12],其响应模式也会发生改变。例如,升温后,岷江冷杉(*Abies faxoniana*)和方枝柏(*Sabina saltuaria*)径向生长呈差异性变宽趋势,对气温的响应减弱^[13];北美阿卡迪亚国家公园油松(*Pinus tabulaeformis*)对气候因子的响应减弱,其中早材对气候响应变化更加明显^[14];哈萨克斯坦阿尔泰山南坡西伯利亚云杉和西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)对气候的响应增强^[15];大兴安岭落叶松(*Larix gmelinii*)对 6—8 月温度响应先增强后减弱^[16]。这些研究表明,在全球变暖的背景下,树木年轮对气候的响应发生了明显变化^[13],且不同地区、不同树种对气候响应变化存在一定的差异。

鸡公山是大别山的余脉,位于中国南北地理分界线,是亚热带季风气候向暖温带季风气候的过渡区^[17],也是气候变化的敏感区域。马尾松(*Pinus massoniana*)是中国亚热带地区分布最广的树种之一,其年轮清晰,是树木年轮气候学研究的重要材料^[6];鸡公山是马尾松生长分布的北界,对气候的响应十分敏感^[18]。过去的研究中,王瑞丽等^[17]发现该地区马尾松径向生长主要受温度和降水的综合作用,且春季气温和晚秋降水的影响更重要;程瑞梅^[18]等认为马尾松径向生长主要受生长季初期和末期的水热组合的影响。这些研究大多为全轮的研究,在早材和晚材方面的研究较少,且未见早材和晚材对气候响应的稳定性研究。

本文拟采用鸡公山顶采集的马尾松样品,建立全轮宽度、早材宽度和晚材宽度年表,分析其生长与气候因子之间的关系,并确定其生长的主要限制因子及升温突变后对气候响应的稳定性。这一研究结果可为以后气候重建奠定基础,也可为当地的森林抚育更新和管理提供更细致的科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

鸡公山国家级自然保护区(114°01'E~114°06'E, 31°46'N~31°52'N)位于河南省信阳市与湖北省随州市交界处(图 1),是中国北亚热带与暖温带的过渡带,同时也是长江与淮河 2 大流域的天然分水岭^[18]。气候复杂,主要受东亚季风的影响,具有明显的过渡性季风气候和山地气候的特征,雨热同期^[17]。年平均气温为 15.4℃,年平均降水量为 1107.46 mm,降水集中在温度最高的 6—8 月,期间降水量占全年降水量的 51.38%,适宜植物的生长,森林覆盖率达到 98%,以亚热带植物为主,兼有部分暖温带植物,植物类型复杂多样,其中针叶树种主要有马尾松和油松^[17]。土壤类型以黄棕壤和黄褐土为主。

1.2 树轮年表的建立

树轮样品是 2019 年 6 月于河南省信阳市鸡公山顶顶部(114°04'59"E, 31°48'25"N, 海拔为 742 m)采集,选择不受干扰的健康大树,在胸径以下部位采样,每棵树 1~2 芯,共采集 26 树 37 芯。经过风干、固定、打磨等预处理,直到在显微镜下能够清晰地分辨出每

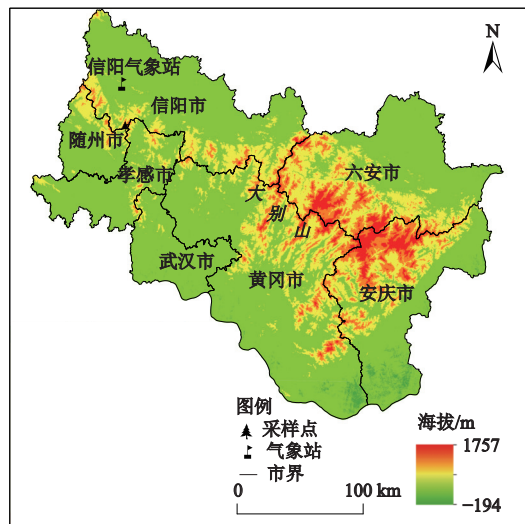


图 1 采样点和附近气象站位置
Fig.1 Schematic diagram of sampling point and nearby meteorological station

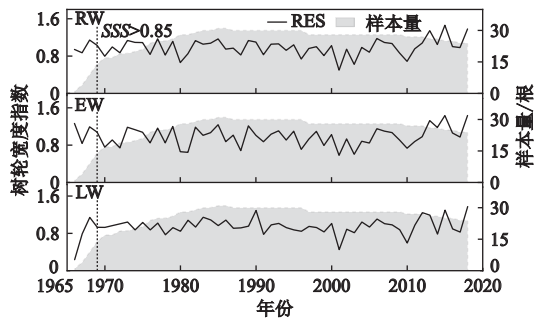
一年轮的单个细胞和边界^[19]。首先利用显微镜进行初步定年; 然后利用精度为 0.001 mm 的 Velmex 年轮宽度测量仪 (Velmex TA Tree Ring System, Velmex, Inc.) 沿着细胞串的走向进行早材与晚材的测量, 早材和晚材之间的边界是根据 Stahle^[20] 等提出的程序确定的, 绝大多数年轮早晚材突变, 直接依照突变界限划分, 对早晚材存在过渡渐变的少量年轮, 以过渡段的中线划分早晚材; 随后利用 TSAP Win 软件和 COFECHA^[21] 程序对交叉定年结果进行质量检验 (滑动窗口为 30 a, 滑动滞后 15 a), 并对样芯的缺年轮与伪年轮进行修正和质量控制, 剔除了与主序列一致性较低的样芯, 最终保留 24 株树 31 根样芯; 最后利用 ARSTAN^[22] 程序制作年表, 运用线性函数和负指数函数去除树木的生长趋势, 之后再利用双权重平均法^[21] 进行生长量订正, 最终各类宽度指标如全轮 (RW)、早材 (EW) 与晚材 (LW) 获得 3 种不同形式的年表 (图 2), 其中差值年表 (RES) 的统计值以及与各气候因子的相关性更好, 因此本文研究选择差值年表。

鸡公山马尾松全轮、早材与晚材年表之间均为显著正相关 ($P < 0.01$), 表明马尾松全轮、早材与晚材年表的变化具有较高的一致性; 其中全轮与早材和晚材均呈现显著正相关 (0.922, 0.671, $P < 0.01$), 但是全轮与早材的相关系数更高, 这表明全轮与早材可能具有较高的一致性^[10], 而早材与晚材之间的相关系数较低 (0.380, $P < 0.01$), 表明早材和晚材存在着较大的差异。

1.3 气象数据的获取

选择距采样点约 30 km 的信阳气象站 (114°03'E, 32°06'N, 海拔 114.5 m) 1951—2018 年逐月平均气温和降水量作为分析指标 (图 3, 来自中国气象数据网 <https://data.cma.cn/>)。利用 Mann-Kendall^[23] 对年平均气温和年降水进行突变检验, 发现气温在 1994 年发生突变 (图 4a), 而降水的年变化不显著 (图 4b)。为了验证气象数据的变化趋势, 利用独立样本 T 检验方法检验, 结果表明 2 个时间段内气温变化趋势存在显著差异 ($P = 0.000$, $t = -7.787$), 2 个时段内降水变化趋势存在一定的差异但不显著 ($P = 0.8265$, $t = 0.220$), 发现 1951—1993 年和 1994—2018 年平均气温的变化差异性。气温突变前后的趋势变化如图 5 所示。

为了探究影响树木生长的关键季节, 除月尺度数据外还使用了季度指标包括上年夏季 (上年 6—8 月)、上年秋季 (上年 9—11 月)、上年冬季 (上年 12 月—当年 2 月)、当年春季 (当年 3—5 月)、当年夏季 (当年 6—8 月)、当年秋季 (当年 9—11 月) 等季度尺度的气象数据。



SSS 为子样本信号强度

图 2 全轮 (RW)、早材 (EW) 与晚材 (LW) 差值年表 (RES) 与样本量

Fig. 2 Residual chronology (RES) and sample size of RW, EW and LW

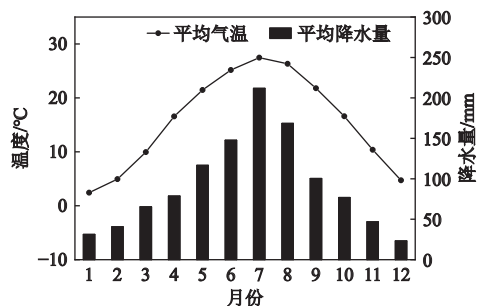


图 3 1951—2018 年信阳气象站资料

Fig. 3 Climatic data from Xinyang meteorological station in 1951—2018

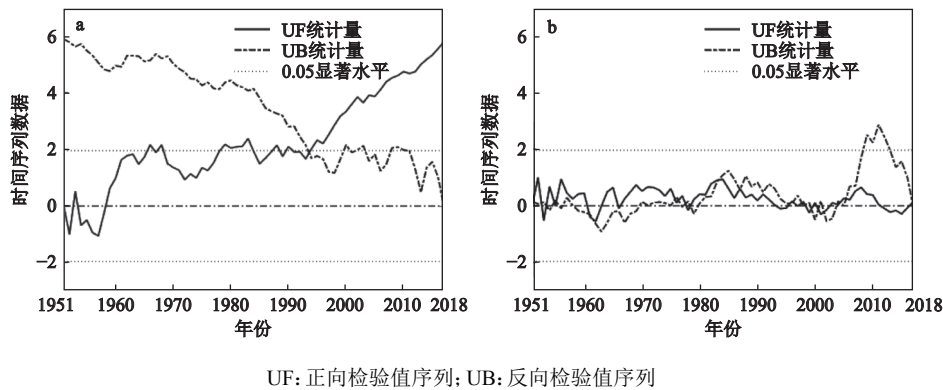


图 4 信阳气象站年均温(a)与年降水(b)的 Mann-Kendall 突变检验

Fig.4 Mann-Kendall mutation test of annual mean temperature (a) and precipitation (b) at Xinyang Meteorological Station

1.4 研究方法

本研究利用树木年轮学的专业软件 Dendroclim2002^[24] 对全轮、早材和晚材宽度指数序列与月平均气温和月降水量进行相关分析,以揭示鸡公山地区马尾松全轮、早材与晚材对气候响应的差异。然后,以升温突变为节点,运用 SPSS 26 软件对年表与气温突变前后平均气温做相关性分析,以揭示气温突变前后树轮宽度对平均气温响应和径向生长变化趋势的差异。

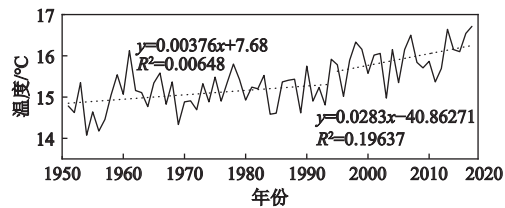


图 5 信阳气象站年平均气温的变化趋势

Fig.5 Trends in annual mean temperature at Xinyang Meteorological Station

2 结果与分析

2.1 年表的统计特征值

年表统计特征值如表 1 所示,全轮、早材与晚材宽度序列的 $SSS>0.85$ 的起始年为 1969 年,包含 14 根样芯。一般认为大于 0.2 就表明树木对气候的响应敏感^[4],本文全轮、早材与晚材年表的平均敏感度均在 0.2 以上,表明了所有年表对气候的响应比较敏感; $R1$ (序列间的平均相关)、 $R2$ (树木内的平均相关)、 $R3$ (树木间的平均相)值相对较高,表明采样点树木生长具有较好的一致性;且均有较高的信噪比(SNR)和总样本解释量(EPS),表明鸡公山马尾松全轮、早材与晚材均包含较多的环境信息。其中,全轮与早材比晚材的信噪比(SNR)和总样本解释量(EPS)高,表明全轮与早材年表中包含有更多的气候信息。

表 1 鸡公山马尾松全轮(RW)、早材(EW)与晚材(LW)差值年表(RES)统计特征值

Table 1 Residual chronology (RES) of RW, EW and LW statistical characteristic values of *Pinus massoniana* in the Jigong Mountain

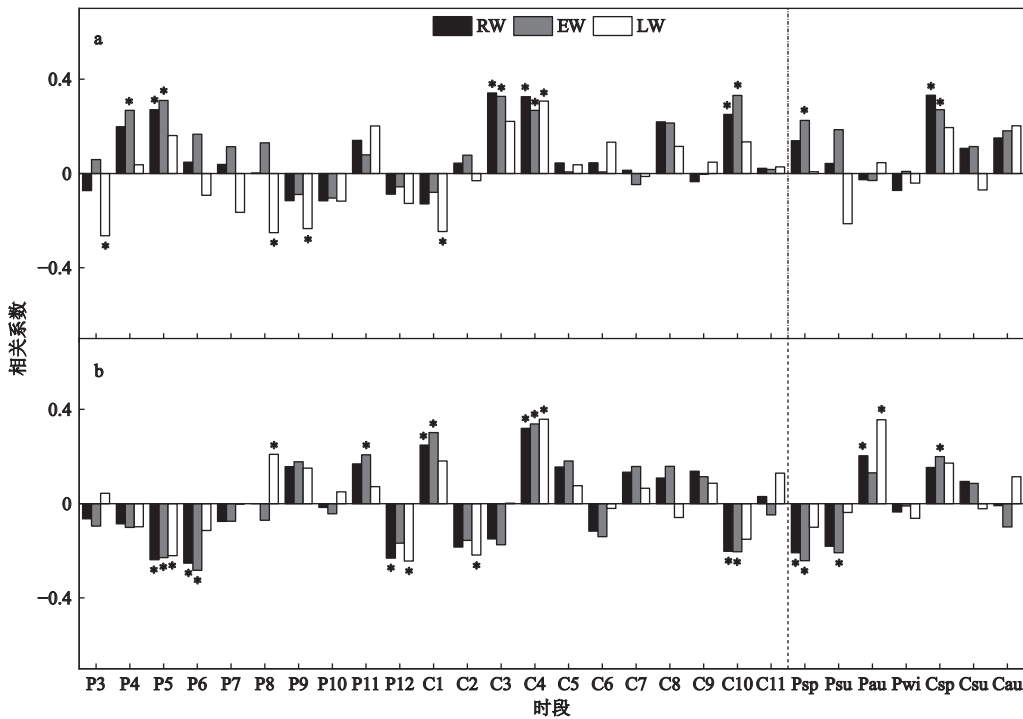
年表特征	样本量	MS	SD	公共区间	R1	R2	R3	SSS>85%	SNR	EPS
全轮	31根	0.227	0.180	1980—2009年	0.262	0.258	0.262	1969—2018年	8.889	0.899
早材	31根	0.253	0.204	1980—2009年	0.227	0.361	0.226	1969—2018年	7.346	0.880
晚材	31根	0.212	0.199	1980—2009年	0.148	0.226	0.147	1969—2018年	4.338	0.813

注:MS, 平均敏感度; SD, 标准方差; R1、R2、R3 分别为序列间的平均相关, 树木内的平均相关, 树木间的平均相关; SSS, 子样本信号强度; SNR, 信噪比; EPS, 总样本解释量。

这一研究结果与浑善达克沙地白扦树轮早材与晚材宽度年表对比研究结果一致^[8]。

2.2 全轮、早材与晚材径向生长对气候的响应

如图 6 所示: 全轮与上年 5 月和当年 3、4、10 月的气温和当年 1、4 月降水呈显著正相关, 与上年 5、6、12 月和当年 10 月的降水呈显著负相关; 早材与上年 4、5 和当年 3、4、10 月气温及上年 11 月和当年 1、4 月降水显著正相关, 与上年 5、6、12 月和当年 10 月的降水呈显著负相关; 晚材与当年 4 月的气温及上年 8 月和当年 4 月的降水呈显著正相关, 与上年 3、8、9 月和当年 1 月的气温及上年 5、12 月和当年 2 月的降水呈显著负相关。



*为 95% 置信度的显著相关; P: 上年月份; C: 当年月份; Psp: 上年春季; Psu: 上年夏季; Pau: 上年秋季; Pwi: 上年冬季; Csp: 当年春季; Csu: 当年夏季; Cau: 当年秋季

图 6 鸡公山马尾松全轮(RW)、早材(EW)与晚材(LW)年表与月均温(a)和降水量(b)的相关分析

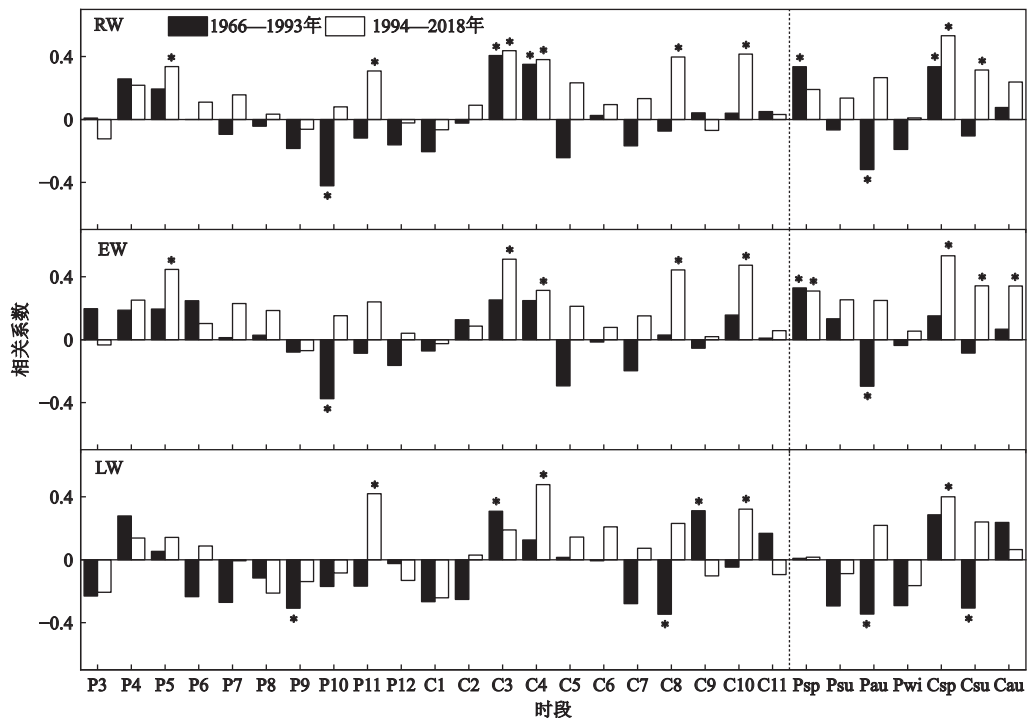
Fig.6 Correlation analysis between chronology of RW, EW and LW with monthly mean temperature (a) and precipitation (b) of *Pinus massoniana* in the Jigong Mountain

从季节角度(图 6)可以看出, 全轮与当年春季气温和上年秋季降水呈显著正相关; 早材与当年春季气温和降水呈显著正相关, 与上年夏季降水呈显著负相关; 晚材与上年秋季降水呈显著正相关。显然, 当年春季的气温是鸡公山马尾松全轮和早材的主要限制因子, 而上年秋季降水是晚材生长的主要限制因子。

2.3 全轮、早材与晚材对温度响应的稳定性分析

年平均气温在 1994 年出现突变, 且 1994—2018 年气温明显高于 1951—1993 年(图 5), 呈升温趋势^[13], 因此本研究将分段对全轮、早材和晚材与气温进行相关分析, 以期了解升温前后树木全轮、早材与晚材生长对气温的响应差异及稳定性。

由图 7 可以看出, 突变前后, 全轮、早材与晚材对气温响应的相关系数和显著水平均发生了不同程度的变化。全轮, 突变前主要受上年秋季和当年春季气温的影响, 突变后主



*为 95% 置信度的显著相关; P: 上年月份; C: 当年月份; Psp: 上年春季; Psu: 上年夏季; Pau: 上年秋季; Pwi: 上年冬季; Csp: 当年春季; Csu: 当年夏季; Cau: 当年秋季

图 7 鸡公山马尾松全轮(RW)、早材(EW)与晚材(LW)年表与月平均温度分段相关分析
Fig.7 Correlation analysis of monthly mean temperature with chronologies of RW, EW and LW of *Pinus massoniana* in the Jigong Mountain

要受当年春季和夏季气温的影响,与气候的响应在突变后正相关有增强,而负相关有减弱的趋势,表明温度升高有利于全轮生长;早材与全轮对气候的相关关系相似,突变前主要受上年秋季气温的影响,突变后主要受当年生长季气温的影响,升温更有利于早材的生长;晚材在突变前主要受上年秋季和当年夏季气温的影响,突变后主要受当年春季气温的影响,可见气温升高晚材对气温响应由负相关转为正相关。总体而言,气温突变后树木径向生长与气温显著相关月份都为正相关,表明无论是马尾松全轮还是早、晚材,温度升高均有利于宽度生长。

2.4 早材、晚材与全轮生长趋势

气温突变前后,全轮、早材和晚材与气温的响应发生了不同程度的变化,也造成了树木全轮、早材与晚材的径向生长发生了一定的变化。

如图 8 所示,经研究发现,在气温突变前,全轮与晚材都会随着温度的升高呈线性增加趋势,早材在气温突变前随着温度的升高变化趋势不明显,而在气温突变后,全轮、早材与晚材都会随着温度的升

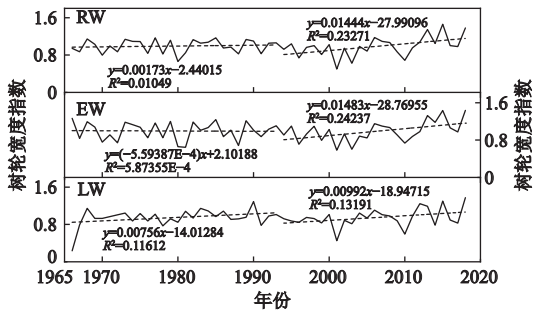


图 8 升温前后鸡公山马尾松全轮(RW)、早材 (RW)与晚材(LW)宽度的变化趋势
Fig.8 Change of RW, EW and LW of *Pinus massoniana* in the Jigong Mountain before and after temperature shift

高呈线性增加的趋势,随着温度的升高,全轮和早材增加的趋势更加显著,晚材的增加趋势不太明显,且在 2001 年、2003 年和 2010 年全轮和早材却是升温后出现的极低生长年,同样晚材在 2001 年和 2010 年表现出极低生长年。

3 讨论

3.1 全轮、早材与晚材对气候变化的响应

研究发现鸡公山马尾松全轮、早材与晚材径向生长对月平均温度和月降水量的响应既有相似性也有差异性^[11,16]。全轮与早材对气候因子的响应更加敏感,这与生长边界地区马尾松^[6]、柳杉^[11]、兴安落叶松^[25]、青海云杉^[26]等的研究结果相似,但与欧洲和北美树木的研究结果相反^[27]。说明树木生长对气候因子响应的敏感性与树种和树木生长的地理位置密切相关^[28]。

本研究中马尾松全轮、早材与晚材对气候因子的响应具有较高的一致性^[8],主要受上年秋季降水和当年春季气温和降水的影响,主要是上一年积累的营养物质,受暖季气温控制^[9];初春气温的迅速回升有利于树木从休眠期恢复,提升土壤和树叶的温度,并能加快根系和发芽速率,提早树木形成层细胞的分裂,从而产生较宽年轮^[29]。

全轮与早材主要受上年生长季前期和当年生长季前期和末期的气温和降水的影响。上年生长季前期气温升高会积累一定的有机营养物质有利于次年树木的萌芽和生长,而降水增加会使太阳辐射减少而导致气温降低,减少光合作用的生产量,影响次年树木的萌发^[30];图 3 表明该地区气温终年都在 0℃ 以上,生长季较长,树木的休眠期很短。因此,当年春季气温的迅速回升且水分适当的增加有利于树木从休眠期恢复,提早树木形成层细胞的分裂、萌芽从而形成较宽年轮^[28,30];生长季后期(如 10 月,图 3 显示 10 月均温在 15℃ 以上)气温的升高有助于延长生长季、从而形成较宽的早材与全轮^[31],但降水量过多也会相应地缩短了树木的生长期^[32]。晚材主要受上年秋季降水和当年生长季前期水热组合的影响,上年秋冬季降水的增加间接使得气温降低,从而减少了营养物质的消耗^[10],生长季前期降水的增加和气温的升高,导致光合作用增强、积累更多的营养物质,从而使晚材有更多的生长时间。总体来看,马尾松全轮和早材包含的气候信息相似度较高,但是早材、晚材包含了一些全轮所不包含的气候信息。

3.2 升温突变前后气温对全轮、早材与晚材响应分析

研究表明,全球气温变暖的趋势在近些年将不可逆转^[1]。气候变化对树木的影响是现实且复杂的,在气温升高后,树木生长对气候因子的响应会发生一定程度的改变^[12]。

鸡公山是马尾松生长分布的北界,气温升高更适宜马尾松的生长。如图 7 显示,全轮与早材对气候响应的相似性较高,全轮与早材在气温突变前主要受上年秋季气温的影响,全轮还受当年春季的气温影响^[18],突变后主要受当年春季和夏季气温的影响,全轮与早材对气候的响应在突变后显著正相关月份相关系数有增强的趋势,负相关有减弱的趋势,表明温度升高全轮与早材对气候响应更加敏感^[13],这与管涔山华北落叶松^[33]和芦芽山华北落叶松^[34]低海拔早材研究结果相同。全轮和早材增加的趋势更加显著,表明升温会加大鸡公山马尾松的生长速率^[18],这与川西^[35-36]地区的岷江冷杉的研究结果一致。晚材在突变前主要受上年秋季和当年夏季气温的影响,突变后主要受当年春季气温的影响,晚材对气温响应的相关系数发生了明显的变化,但是对气温响应的敏感程度没有明显的规律变化,但也呈现出正相关有增强的趋势,负相关有减弱的趋势,这与张辉等^[37]的研究结果相同。

总体而言,鸡公山是马尾松分布的北界,对气温的响应比较敏感,当气温升高,树木径向生长与气温的正相关都呈增加的趋势,表明气温升高有利于鸡公山马尾松径向生长。

3.3 升温突变后全轮、早材与晚材低生长特征年分析

气温突变后, 2001 年、2003 年和 2010 年出现极端低生长年, 说明随着气温的升高, 可能降水也发生了变化, 因此, 这里从上年和当年的气温、降水量与多年平均进行单月距平分析比较。如图 9 所示, 2001 年的降水量距平从当年 3 月到 9 月即春季到秋季都是负值, 基本上整个生长季降水比多年平均降水量低, 说明 2001 年为干旱年, 所以全轮、早材与晚材序列都是窄轮^[38]; 在 2003 年和 2010 年, 当年春季(3—5 月)气温明显的负距平, 初春的低温抑制了马尾松的萌芽生长, 使早材、晚材及全轮形成较窄的年轮序列^[28], 其中晚材不太显著, 2009 年 11 月的强烈负距平可能使马尾松受到低温冷害^[39]。总之, 鸡公山马尾松的全轮、早材与晚材都会因为气温和降水的较低或不足而受抑制形成较窄的年轮序列。

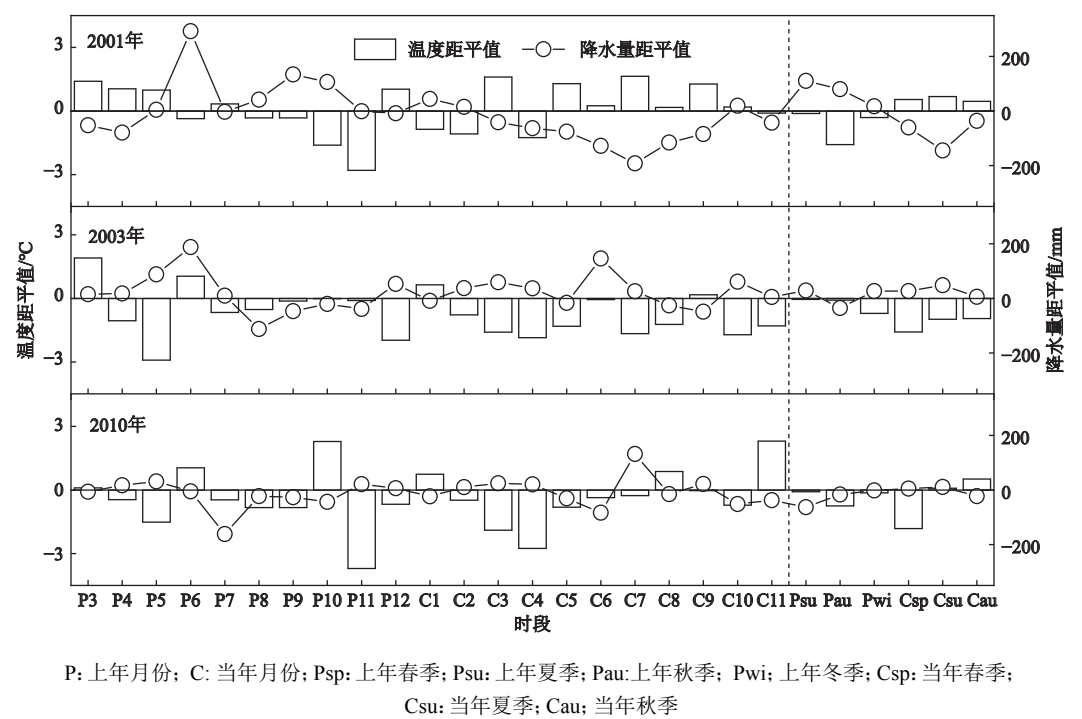


图 9 鸡公山极端低生长年单月平均气温与降水的距平值

Fig.9 Anomalies of monthly mean temperature and precipitation in extreme low growth year in the Jigong Mountain

4 结论

鸡公山马尾松全轮、早材与晚材年表均包含较多的气候信息, 全轮、早材与晚材对气候的响应具有较高的一致性, 尤其全轮与早材的一致性最高, 早材和晚材所含的环境信息存在着较大的差异。全轮与早材对气候的响应比较敏感, 气温升高后, 全轮、早材与晚材对气候的响应均发生了一定的变化, 且全轮与早材径向生长趋势变化明显, 晚材径向生长趋势变化不太明显。当年春季的温度是鸡公山马尾松全轮和早材的主要限制因子, 而上年秋季降水是晚材生长的主要限制因子, 气温的升高有利于鸡公山马尾松径向生长, 使鸡公山地区更适宜马尾松的生长。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

- [2] 郭雪梅, 王兆鹏, 张楠, 等. 樟子松和落叶松径向生长对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3405-3414. [Guo Xuemei, Wang Zhaopeng, Zhang Nan et al. Responses of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix gmelinii* to climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3405-3414.]
- [3] Henrik Saxe, Cannell M G R, Øystein Johnsen et al. Tree and forest functioning in response to global warming[J]. *New Phytologist*, 2001, 149(3): 369-399.
- [4] 吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990. [Wu Xiangding. Tree rings and climate change. Beijing: China Meteorological Press, 1990.]
- [5] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 265-271. [Shao Xuemei. Advancements in dendrochronology. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(3): 265-271.]
- [6] 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 Hongliang, Wang Jian, Shang Zhiyuan et al. Divergence response of earlywood, latewood chronologies of *Pinus massoniana* to climatic factors. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1150-1162.]
- [7] 姜盛夏, 袁玉江, 喻树龙, 等. 阿尔泰山西伯利亚云杉多种树轮宽度年表研制及其气候响应研究 [J]. 地球环境学报, 2020, 11(6): 616-628. [Jiang Shengxia, Yuan Yujiang, Yu Shulong et al. Development of multiple tree-ring width chronologies of *Picea obovata* for the Altay Mountains, China, and their climate response. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(6): 616-628.]
- [8] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 等. 浑善达克沙地白扦树轮早晚材宽度年表对比分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 47-53. [Zhang Tongwen, Yuan Yujiang, Wei Wenshou et al. Developments and analysis of multi-tree-ring width chronologies of *Meyer spruce* in the Ortindag sand land. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, 10(1): 47-53.]
- [9] 马晓琦, 史江峰, 史逊远, 等. 江西三清山黄山松树轮早晚材宽度所指示的气候意义 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1825-1834. [Ma Xiaqi, Shi Jiangfeng, Shi Shiyuan et al. Climatic significance of the earlywood and latewood width of *Pinus taiwanensis* in Sanqingshan, Jiangxi Province of China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8): 1825-1834.]
- [10] 白天军, 刘苑秋, 温林生, 等. 庐山日本柳杉早材与晚材年轮宽度对气候变化的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 61-69. [Bai Tianjun, Liu Yuanqiu, Wen Linsheng et al. Response of earlywood and latewood ring width of *Cryptomeria japonica* to climate change in Lushan Mountain, eastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(9): 61-69.]
- [11] 赵安玖, 郭世刚, 杨旭, 等. 川西南柳杉早材、晚材年表与温度和降雨的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1603-1609. [Zhao Anjiu, Guo Shigang, Yang Xu et al. Relationship between radial growth of earlywood, latewood of *cryptomeria fortune* with temperature and precipitation change in southwest Sichuan Province, China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(11): 1603-1609.]
- [12] 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 等. 树木年代学的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1879-1888. [Fang Keyan, Chen Qiuyan, Liu Changzhi et al. Research advances in dendrochronology. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1879-1888.]
- [13] 李静茹, 彭剑峰, 杨柳, 等. 川西高原两种针叶树径向生长对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3512-3520. [Li Jingru, Peng Jianfeng, Yang Liu et al. Responses of radial growth of two coniferous species to climate factors in Western Sichuan Plateau, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(10): 3512-3520.]
- [14] Thomas Patterson, Stockton Maxwell, Grant Harley et al. Climate—Growth relationships of *Pinus rigida* (Mill.) at the Species' Northern Range Limit, Acadia National Park, ME[J]. *Northeastern Naturalist*, 2016, 23(4): 490-500.
- [15] 刘蕊, 王勇辉, 姜盛夏, 等. 哈萨克斯坦阿尔泰山树木径向生长及其对气候要素的响应 [J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 723-733. [Liu Rui, Wang Yonghui, Jiang Shengxia et al. Radial growth of trees in response to climatic factors in the Altay Mountains, South of Kazakhstan. *Arid Zone Research*, 2019, 36(3): 723-733.]
- [16] 白学平, 常永兴, 张先亮, 等. 近 30 年快速升温对两种典型小地形上兴安落叶松径向生长的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 3853-3861. [Bai Xueping, Chang Yongxing, Zhang Xianliang et al. Impacts of rapid warming on radial growth of *Larix gmelinii* on two typical micro-topographies in the recent 30 years. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 3853-3861.]
- [17] 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等. 北亚热带马尾松年轮宽度与 NDVI 的关系 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5762-5770. [Wang Ruili, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa et al. Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in north subtropical region. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5762-5770.]
- [18] 程瑞梅, 封晓辉, 肖文发, 等. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2086-2095. [Cheng Ruimei, Feng Xiaohui, Xiao Wenfa et al. Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in north subtropical region. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2086-2095.]
- [19] James H. Speer. Fundamentals of tree-ring research [M]. Tucson: The University of Arizona Press, 2010: 87-105.
- [20] Stahle D W, Malcolm Cleaveland, Grissino-Mayer H D et al. Cool- and warm-season precipitation reconstructions over

- western New Mexico[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(13): 3729-3750.
- [21] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [22] Cook E R, Holmes R L. Users manual for program AR-STAN[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 302.D0I:10.2172/138036.
- [23] Maurice George Kendall. Rank correlation methods[J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [24] Franco Biondi, Kishor Waikul. DENDROCLIM902: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies[J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [25] 郑广宇, 王文杰, 王晓春, 等. 帽儿山地区兴安落叶松人工林树木年轮气候学研究 [J]. *植物研究*, 2012, 32(2): 191-197. [Zheng Guangyu, Wang Wenjie, Wang Xiaochun et al. Tree-ring climatology of *Larix gmelinii* in Maoershan Region, Northeastern China. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(2): 191-197.]
- [26] 徐金梅, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 祁连山青海云杉径向生长对气候的响应 [J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(2): 1-6. [Xu Jinmei, Bao Fucheng, Lyu Jianxiong et al. Climate response of radial growth of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains of Northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(2): 1-6.]
- [27] Koh Yasue, Ryo Funada, Osamu Kobayashi et al. The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to climatic factors[J]. *Trees*, 2000, 14(4): 223-229.
- [28] Malcolm Cleaveland. Climatic response of densitometric properties in semiarid site tree rings[J]. *Tree-ring Bulletin*, 1986, 46: 14-29.
- [29] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 天山云杉和西伯利亚落叶松的树轮气候记录 [J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 460-465. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu et al. Climatic records of tree-ring width in *Picea schrenkiana* Fisch and *Larix sibirica* Ledeb. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(4): 460-465.]
- [30] 岳伟鹏, 陈峰, 袁玉江, 等. 气候变暖背景下云南西北部大果红杉径向生长衰退及其气候驱动因子分析 [J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2331-2341. [Yue Weipeng, Chen Feng, Yuan Yujiang et al. The decline in radial growth of *Larix potaninii* in Northwestern Yunnan and its driving factors under the background of climate warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2331-2341.]
- [31] 张贇, 尹定财, 张卫国, 等. 普达措国家公园 2 个针叶树种径向生长对温度和降水的响应 [J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5383-5392. [Zhang Yun, Yin Dingcai, Zhang Weiguo et al. Response of radial growth of two conifers to temperature and precipitation in Potatso National Park, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5383-5392.]
- [32] 彭剑峰, 勾晓华, 陈发虎, 等. 阿尼玛卿山地祁连圆柏径向生长对气候的响应 [J]. *地理学报*, 2007, 62(7): 742-752. [Peng Jianfeng, Gou Xiaohua, Chen Fahu et al. Horizontal variations of climatic response of Qilian Juniper (*Juniperus przewalskii*) in the Anyemaqen Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 742-752.]
- [33] 王嘉川, 李书恒, 郭伊利, 等. 管涔山华北落叶松径向生长对温度变化的动态响应 [J]. *生态学杂志*, 2023, 42(7): 1568-1576. [Wang Jiachuan, Li Shuheng, Guo Yili et al. Dynamic response of radial growth of *Larix principis-rupprechtii* to temperature change in Guancen Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(7): 1568-1576.]
- [34] 郭伊利, 李书恒, 王嘉川, 等. 芦芽山华北落叶松早晚材径向生长对气候变化响应的分离效应 [J]. *干旱区研究*, 2022, 39(5): 1449-1463. [Guo Yili, Li Shuheng, Wang Jiachuan et al. Response divergence of radial growth to climate change in earlywood and latewood of *Larix principis-rupprechtii* in Luya Mountain. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5): 1449-1463.]
- [35] 郭滨德, 张远东, 王晓春. 川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 354-364. [Guo Binde, Zhang Yuandong, Wang Xiaochun. Response of *Picea purpurea* and *Abies faxoniana* tree rings at different slope aspects to rapid warming in western Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 354-364.]
- [36] 赵志江, 郭文霞, 康东伟, 等. 川西亚高山岷江冷杉和紫果云杉径向生长对气候因子的响应 [J]. *林业科学*, 2019, 55(7): 1-16. [Zhao Zhijiang, Guo Wenxia, Kang Dongwei et al. Response of radial growth of *Abies faxoniana* and *Picea purpurea* to climatic factors in Subalpine of Western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(7): 1-16.]
- [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 Hui, Yan Yao, Hu Yanan et al. Analysis on the relationship between radial growth of *Cunninghamia lanceolata* and climatic factors based on tree-ring climate correlation. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, 49(1): 59-66.]
- [38] 王亚军, 李明启. 中国利用树轮资料重建干湿变化研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(11): 1397-1410. [Wang Yajun, Li Mingqi. Research progress of dry-wet climate reconstruction by tree ring in China. *Progress in Geography*, 2016, 35(11): 1397-1410.]
- [39] 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 Jingjing, Wang Tong, Pan Lei et al. Responses of radial growth to climate change in *Pinus massoniana* at different altitudes and slopes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2231-2240.]

Response of growth in early-wood and late-wood of *Pinus massoniana* to abrupt warming in the north-south transition zone: A case of the Jigong Mountain National Nature Reserve in Henan

Li Jinkuan¹, Peng Jianfeng^{1,2}, Peng Meng¹, Wei Xiaoxu¹, Li Xuan¹, Cui Jiayue¹

(1. College of Geographical Sciences, Faculty of Geographical Science and Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, Henan, China; 2. Key Laboratory of Earth System Observation and Simulation of Henan Province, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Global warming causes change in tree growth and even the whole forest ecosystem. The Jigong Mountain is located in the transitional zone between north subtropical zone and warm temperate zone. Tree growth in the Jigong Mountain is sensitive to climate change. However, the relationship between the radial growth of *Pinus massoniana* at the edge of the distribution and climate change is not clear. In this paper, the response and stability of whole ring (RW), early-wood (EW) and late-wood (LW) radial growth data of *Pinus massoniana* to climate change at peak of Jigong Mountain were analyzed. The results showed that the residual chronologies of RW, EWW and LWW of *Pinus massoniana* in the Jigong Mountain contained more climate information, and there was a high correlation between RW and EWW and LWW chronologies. The response of RW and EWW chronologies to climate was better than that of LWW chronology. There was also a certain difference between RW and EWW and LWW chronologies and the climatic factors. RW and EWW were mainly affected by the temperature and precipitation in the early and late growing season of last year, and the combination of water and heat in the spring was the main limiting factor affecting the radial growth of *Pinus massoniana* in this area. LWW was mainly affected by the precipitation in last autumn and the combination of water and heat in the early growing season. After the abrupt change of annual mean temperature in the Jigong Mountain in 1994, the annual ring index of RW and EWW increased obviously, but the annual ring index of LWW did not change visibly. The response of RW and EWW to temperature was enhanced while the response of LWW to temperature was not obvious. Therefore, through the analysis of different indexes of the annual rings of *Pinus massoniana* at Peak of the Jigong Mountain, we can deeply understand the different responses of radial growth of *Pinus massoniana* to temperature changes, and provide a scientific basis for forest renewal, protection and management in the western Dabie Mountains.

Key words: the Jigong Mountain; *Pinus massoniana*; tree-ring width; response to climate change; abrupt temperature change