

韦晓旭, 彭剑峰, 彭猛, 等. 中国南北过渡带油松径向生长对气候因子的响应研究——以鸡公山国家级自然保护区为例 [J]. 地理科学, 2024, 44(9): 1643-1652. [Wei Xiaoxu, Peng Jianfeng, Peng Meng et al. Response of *Pinus tabulaeformis* radial growth to climate factors in the north-south transition zone of China: Case study in the Jigong Mountain. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(9): 1643-1652.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20220805

中国南北过渡带油松径向生长对 气候因子的响应研究 ——以鸡公山国家级自然保护区为例

韦晓旭¹, 彭剑峰^{1,2,3}, 彭猛¹, 李轩¹, 崔佳月¹, 李金宽¹, 魏亚飞^{1,2}

(1. 河南大学地理与环境学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省地球系统观测与模拟重点实验室, 河南 开封 475004;
3. 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 河南 开封 475004)

摘要: 本研究以河南省信阳市鸡公山自然保护区的油松林为研究对象, 利用树木年轮学方法建立了油松径向生长宽度年表, 其特征值表明, 油松标准年表的质量较高, 包含较多的气候信息, 能反映气候变化对树木生长的影响。标准年表与鸡公山南北气象站(麻城和信阳站)的气象因子相关结果发现: 油松生长与鸡公山南侧麻城气象站几乎与所有月份气温都呈负相关, 与当年 5—7 月气温(6 月的平均气温, 5、6 月平均最高气温和 6、7 月平均最低温度)呈显著负相关, 而与几乎所有月份相对湿度都呈正相关, 表明过渡带南侧高温带来的土壤水分胁迫对油松生长主要起着限制作用, 南侧春末夏初 4—6 月相对湿度是油松生长的限制因子; 鸡公山北侧信阳气象站生长季及生长季后期 8—9 月气温(8 月平均气温、8、9 月平均最低气温)对油松生长有明显的促进作用, 上年 7—8 月相对湿度是油松生长的限制因子, 北侧生长季后期 9 月降水对油松生长的促进作用具有滞后效应。滑动相关分析显示出, 近几年油松生长对过渡带北侧信阳气象站 8—9 月平均气温的正响应趋势增强; 在气候变暖的情景下, 受到高温抑制(亚热带的麻城气温负相关), 油松生长南界可能会向北移动。油松响应气候变暖的生长动态研究旨在为过渡带森林管理与更新提供基础数据支持。

关键词: 鸡公山; 油松; 树轮宽度; 气候响应; 南北过渡带

中图分类号: P936 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)09-1643-10

植被分布格局是植被对气候长期适应的结果。自 20 世纪后期以来, 全球气候持续变暖对气候-植被系统产生了显著影响^[1], 植被生长的适宜区在迁移、扩张或缩小, 在中国, 包括油松在内的一些物种向高纬度、高海拔地区迁移^[2]; 树木径向生长与气候的关系更加复杂, 越来越多的研究也指出树木生长存在“分异现象”, 一些树木对气候响应的敏感性降低, 甚至呈现出生长下降^[3-4]; 在秦岭南坡^[5]、河北^[6]等地区均发现了油松的生长“分异现象”。过渡带界限区域树木生长的限制因子及其对气候变化的敏感性更易发生改变而出现生长适宜区的迁移变化, 所

以研究树木对水平分布边界气候的响应一直是引人关注的课题。

树木年轮具有定年准确、连续性强、分辨率高、易于采集等优点, 其中保留着大量气候变化的信息, 在全球变化研究中发挥着重要作用^[7]。利用树木年轮分析气候变化的研究中最常用的研究指标是树轮宽度^[8], 从中国树轮宽度的研究结果来看, 树轮研究已遍布中国^[9], 树轮宽度与气候因子的关系在水平格局上呈现出一定的规律性, 整体上北方地区树轮宽度以响应降水为主, 南方地区则以温度为主^[10]; 但水平格局上森林动态变化的研究主要涉及不同纬

收稿日期: 2023-01-20; **修订日期:** 2023-05-12

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: 韦晓旭(1999—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事树木年轮与气候变化研究。E-mail: weixu@henu.edu.cn

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

度梯度^[11-12]、北方林线^[13]生态过渡带等方面,过渡带树木生长对南北两侧气候响应的研究较少。近年来,总体上中国北方地区增温速度大于南方地区^[14],降水变化不明显^[15];由于秦岭的屏障作用,秦岭以南降水较多,年降水量大于秦岭以北^[16],秦岭以北较秦岭以南冷且干燥;秦岭以北的热量增加幅度稍大于以南的地区。气候变暖使南北方局地气温和降水格局产生差异,而温度和降水是影响树木生长的主导气候因子,有研究在综述秦岭地区南部和北部已有的树木年轮学研究后发现,北部树木生长多表现为与降水显著正相关,与气温显著负相关;南部多响应气温,而与降水的关系不明显^[17],但缺少秦岭-淮河过渡带同一生境同一树种树木响应南北两侧气候对比的树轮研究来加以验证。

鸡公山位于大别山的西部,是秦岭-淮河线的重要组成部分,是植被、气候等的生态敏感和过渡区。近年来鸡公山地区针叶树种生长状况弱于阔叶树种,植被呈现出向阔叶林演替的趋势^[18]。油松(*Pinus tabulaeformis*)是中国北方特有的针叶树种^[19],鸡公山过渡带又是油松分布的南界,油松生长在边界极限环境下,年轮边界比较清晰,是研究树木对气候变化响应的理想树种。中国北方地区和西北干旱半干旱地区开展了较多的油松树轮研究^[20-21];河南境内的东秦岭地区的油松树轮研究主要集中在伏牛山^[22]及主脉或余脉的尧山^[23]、龙池堰^[24]、宝天曼^[25]、嵩山^[26]等地区,建立的油松树轮宽度年表表明油松对伏牛山山体南北两侧气候响应呈现差异;伏牛山北部尧山、龙池堰、嵩山的油松生长都与当年生长季前期及生长季5—7月单月或月份组合的气候条件密切相关,5月降水量对树木生长具有显著促进作用;伏牛山南部白云山、宝天曼油松生长一般从4月开始受到水分胁迫,北部一般从5月开始。大别山地区的树轮研究主要以黄山松^[27-28]、马尾松^[18,29]为主要树种,油松仅见大别山中部有树轮宽度^[30]和稳定碳同位素^[31]研究;其支脉鸡公山开展的也多为马尾松^[18,29]树轮研究,油松树轮研究也较少;在大别山,树木年轮响应气候的时间稳定性^[32]研究也较少,油松生长对南北两侧气候的响应及其稳定性的对比研究尚未发现,这不利于大别山过渡带西部油松生态系统的保护。

在气候变暖的背景下,亚热带北界不同位置也在发生不同的推移变化,因此,本文的研究目的:

- ① 建立大别山西段鸡公山顶油松树轮宽度年表;
- ② 分析鸡公山油松生长对南北两侧气候因子的响应及动态,为过渡带油松树轮宽度的进一步研究及森林管理和更新提供一定的基础数据支持。

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)位于河南南部和湖北北部的交界地区,距信阳市38 km,其东接大别山,西与桐柏山交界,近东西走向,主峰报晓峰,海拔768 m;处于暖温带和北亚热带的过渡地区,是中国重要的南北过渡带,是气候变化的敏感区域。鸡公山属于北亚热带边缘,受东亚季风气候的影响,具有北亚热带向暖温带过渡的季风气候和山地气候的特征,四季分明,雨热同期。春季气温变幅大、夏季炎热雨水多、秋高气爽温差小、冬长寒冷雨雪稀。年平均气温15.2℃,极端最高气温40.9℃,极端最低气温-20.0℃。年平均降水量1346.9 mm,降水主要集中在春末和夏季。鸡公山植物种类繁多,由典型的北亚热带常绿阔叶林与落叶阔叶林地带向暖温带落叶阔叶林地带过渡,其中分布较广且数量较大的主要有麻栎(*Quercus acutissima*)、栓皮栎(*Quercus*)、短柄枹(*Quercus serrata* var. *brevipetiolata*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、杉木(*Chinese fir*)等^[33]。这里属于油松分布的南缘,油松生长在其土壤条件较好的地区。鸡公山地区土层较薄,土体砾石含量较多,有机质层较少,土壤以黄棕壤和砂岩石质土等为主,土层深度为20~50 cm, pH值为5~6。

1.2 野外采样和年表的建立

采样点位于河南省信阳市鸡公山主峰报晓峰的东坡,位置为114°05'05"E, 31°48'45"N,海拔为731 m。选择油松成片分布、受干扰较小的健康树木,用生长锥在树木胸高处(高度1.2 m)以下位置采样,每棵树沿不同方向采集1~2芯,共采集26树45芯。采样点和气象站位置见图1。

将野外装入塑料管中的完好样芯带回实验室后、进行样芯的固定、编号、晾干和打磨,直至在显微镜下能够清晰地看出年轮的细胞和早晚材边界^[34]。初步交叉定年后,利用树木年轮宽度测量仪进行宽度测量,然后利用COFECHA程序^[35]对交叉定年结果进行检验,筛选出问题样芯并进行重复测量检

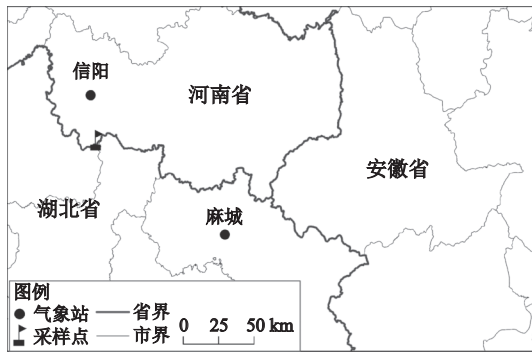


图1 采样点和相邻气象站的位置

Fig.1 Location of sampling sites and meteorological stations

查, 剔除与主序列相关性差的奇异样芯, 最终使用 24 棵树的 37 根芯。通过 ARSTAN 程序^[36], 采用负指数函数和线性函数拟合得到树木生长趋势曲线, 然后用原始样本序列值除以生长趋势曲线的值进行生长量订正, 最终建立了鸡公山采样点油松的标准年表(STD)、差值年表(RES)。标准年表的年表特征统计值以及与气象站气候因子的相关性优于差值年表, 所以本研究选择了标准年表进行接下来的研究。

1.3 气象数据

选择了与鸡公山距离较近, 分布在采样点北的信阳气象站(114°03'E, 32°06'N, 114.5 m)和采样点东南大别山南侧的麻城气象站(115°01'E, 31°11'N, 59.3 m)(来自中国气象数据网 <https://data.cma.cn/>), 选择时段为 1971—2018 年(图 1)。气象要素选择了月平均气温、月平均最低气温、月平均最高气温、月降水量、月平均相对湿度及平均气温和降水量年均变化(图 2)。

1.4 研究方法

利用 DendroClim2002 国际树轮程序, 将采样点油松标准年表与信阳气象站和麻城气象站的气候因子进行相关分析, 图 2 显示 3—11 月平均气温都大于 5℃, 达到树木开始生长的温度需求, 考虑到树木生长的滞后效应, 相关分析时段选取上年 3 月到当年 11 月共 21 个月, 以确定影响树木径向生长的限制因子及其月份; 并利用其 Evolutionary and Moving Response and Correlation 模块, 通过 Moving intervals(窗口年限为 28 a), 分析树木径向生长与气候因子的时间序列稳定性, 以研究树木生长对南北两侧气候的动态响应。考虑到年表分析的可靠性, 选择 1974 年(子样本信号强度 SSS>0.85)作为

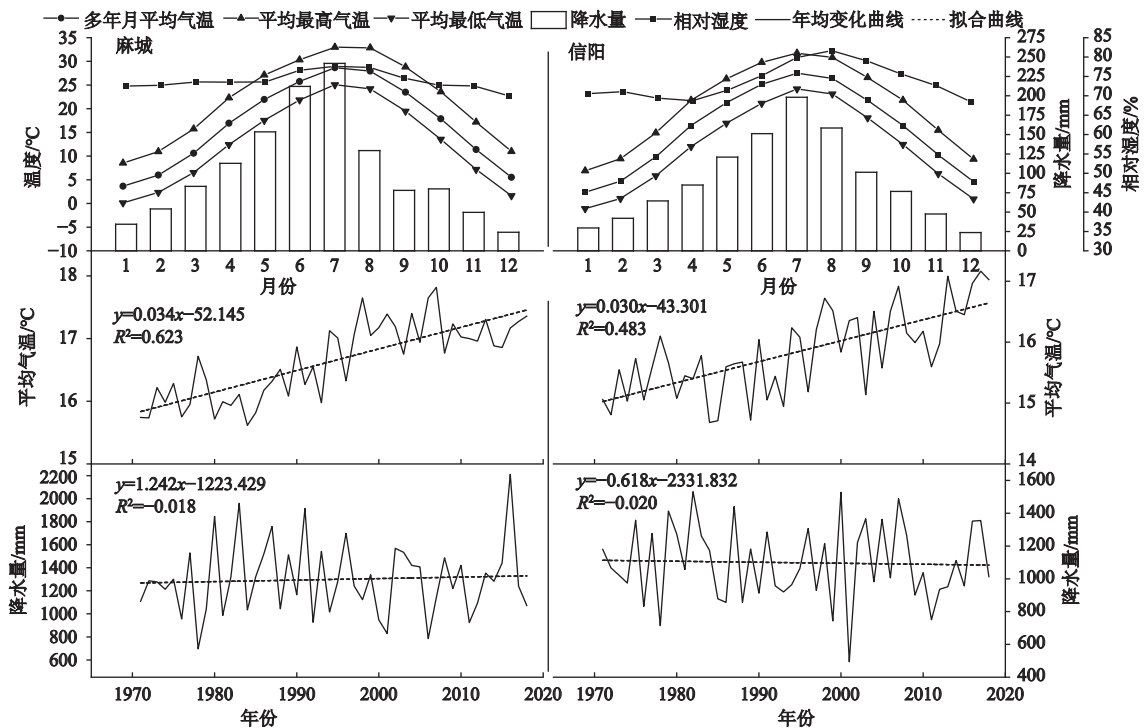


图2 1971—2018 年麻城和信阳气候要素变化情况

Fig.2 Variation of climatic elements in Macheng and Xinyang from 1971 to 2018

起始年份,时间序列时段为 2002—2018 年。

2 结果

2.1 树轮年表统计特征分析

油松树轮宽度指数和样本量如图 3 所示,根据 $SSS>0.85$ 来确定年表的可靠长度为 1974—2018 年。建立的标准年表的统计特征如表 1 所示,树木宽度年表的平均敏感度为 0.192,表明树木生长对气候的响应比较敏感;样间相关系数 R1、树内相关系数 R2 和树间相关系数 R3 分别为 0.452、0.700 和 0.447,表明采样点油松年轮宽度变化有较高的一致性;标准年表的信噪比(SNR)为 30.473,样本解释总量(EPS)为 0.968,表明年表中含有较多的气候信息。

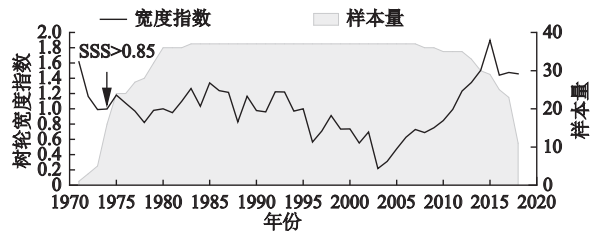


图 3 油松树轮宽度指数和样本量

Fig.3 Tree ring-width index and sample depth of *Pinus tabulaeformis*

表 1 油松树轮宽度标准年表的基本统计量

Table 1 Basic statistics tree ring-width standard chronology of *Pinus tabulaeformis*

年表特征	统计量
样本量(树/芯)	24/37
时段	1970—2018年
平均敏感度	0.192
标准方差	0.349
公共区间年份	1983—2007年
序列间的平均相关	0.452
树木内的平均相关	0.700
树木间的平均相关	0.447
SSS>0.85起始年-样芯数	1974年-16
信噪比	30.473
总体代表性	0.968

2.2 树木生长对南北两侧气象要素的响应

由图 4a 和图 4c 可知,油松生长对过渡带南侧气候响应存在明显规律性,与几乎所有月份气温呈负相关,显著负相关在当年 5—7 月(6 月的平均气温,5、6 月平均最高气温和 6、7 月平均最低温度)

以及上年 6、9 月、当年 9 月(平均气温、平均最高气温);响应相对湿度与气温大体相反,与几乎所有月份相对湿度都呈正相关,当年 4—6 月相对湿度是油松生长响应过渡带南侧气候的限制因子。仅与当年 10 月、上年 9 月降水量呈显著正相关。

由图 4b 和图 4d 可知,油松生长对过渡带北侧气候响应无明显规律,油松生长对过渡带南北两侧温度响应存在差异,与北侧 8—9 月气温(8 月平均气温、8、9 月平均最低气温)显著正相关;上年 7—8 月相对湿度是油松响应过渡带北侧气候的限制因子。油松生长仅与上年 9 月降水量显著正相关。

相关分析结果表明,南侧春夏初高温抑制油松生长,北侧生长季及生长季后期高温促进油松生长;油松生长受到生长季后期气候的显著影响,并表现出受北侧生长季后期降水量影响的滞后效应。

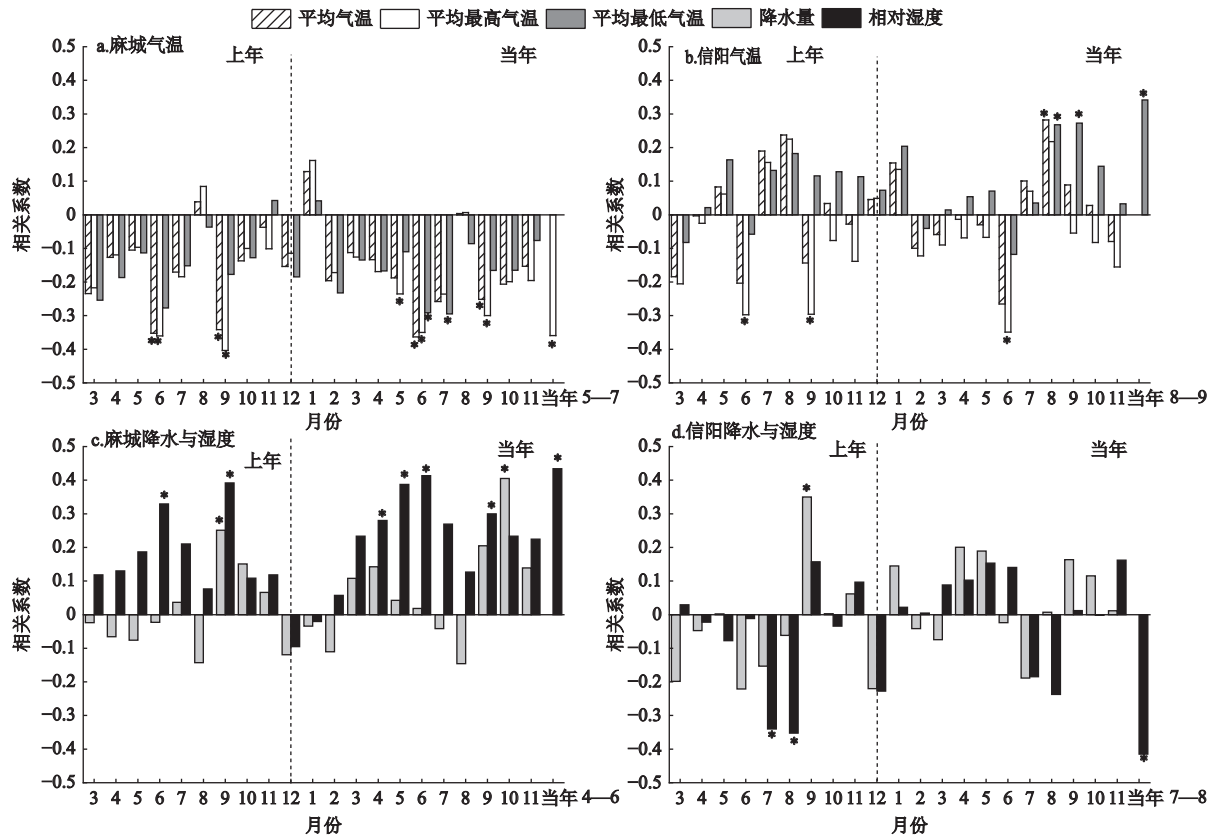
2.3 油松对月均温度和降水的滑动响应

为了进一步了解过渡带油松径向生长对南北两侧温度和降水响应在时间维度上的变化,将树轮年表分别与麻城气象站和信阳气象站的月平均温度、月降水量进行滑动相关分析(滑动窗口为 28 a),选取上年 9 月至当年 10 月一个完整的油松生长季,分析 2002—2018 年间油松生长对温度和降水的动态响应。并依据树轮年表与气候因子的相关分析结果,选取过渡带油松径向生长有显著影响的麻城气象站当年 5—7 月平均最高气温、当年 4—6 月相对湿度和信阳气象站当年 8—9 月平均最低气温、上年 7—8 月相对湿度 4 个月份组合气候因子进行滑动相关分析,以分析这些主导气候因子对油松生长影响的稳定性,具体结果如图 5 所示。

由图 5a 和图 5b 可知,油松生长对过渡带南侧气温负响应的稳定性强,在生长季前期,稳定负响应当年 5—7 月平均最高气温、正响应当年 4—6 月相对湿度,但与当年 6、7 月平均气温的滑动相关系数自 2012 年降为不显著。随时间的变化,对北侧当年 8 月平均温度的响应出现由负转正,近年来,与当年 8—9 月平均最低气温的正相关、当年 7—8 月相对湿度的负相关稳定性呈现出增强的趋势。油松生长尤其稳定响应南北两侧生长季后期的气温和降水量,与南北两侧上年 9 月平均气温的负响应关系都最为稳定。

2.4 树木生长变化特征

根据相关分析结果,麻城气象站当年 4—6 月相对湿度和信阳气象站上年 7—8 月相对湿度是对



*为 $P < 0.05$

图4 油松树轮宽度标准年表与麻城和信阳气象站气候要素的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between tree ring-width standard chronology and climatic elements of Xinyang and Macheng meteorological stations

油松生长影响最显著的气候因子, 本文尝试将油松树轮宽度指数分别于这 2 个气候因子进行对比, 分析干旱对树木生长的影响。

3 讨论

3.1 油松生长响应过渡带南北两侧气象站的气候因子

研究区是油松生长的南部边界, 马尾松和黄山松的生长北界, 因此这些针叶树种对气候变化非常敏感。本研究鸡公山油松对南侧麻城气象站气温和相对湿度的相反响应, 与 Peng 等^[23] 的尧山油松生长与 5—7 月气温的负相关、4—7 月相对湿度的正相关一致; 也与麻城马尾松^[37] 和大别山地区黄山松^[27-28, 32] 的树轮研究结果基本一致。15—25℃ 是油松生长的最适宜温度, 麻城气象站 4 月平均气温接近 15℃, 5 月份平均最低气温和平均最高气温大致分别为 15℃ 和 25℃ (图 2), 6—7 月进入梅雨时节使升温抑制, 因此 5—7 月可能是研究区油松的生

长旺盛期^[30], 若出现空梅或少梅, 高温加强了蒸发蒸腾, 使树木径向生长耗水多, 树木生长遭受干旱胁迫, 形成窄轮; 此时较大的相对湿度能够减少蒸发和蒸腾作用, 弥补降水的不足^[27]; 可见, 油松生长受到南侧春末夏初高温与相对湿度相互作用于土壤水分可利用性的影响。

而信阳位于大别山北部, 典型的过渡性季风气候, 夏热多雨、暴雨常现, 一年两次的汛期分别出现在 6 月下旬至 7 月上旬和 7 月下旬至 8 月上旬, 7 月份是信阳降水量高度集中的月份, 也是一年中气温最高的月份 (图 2)。7、8 月高温和充沛降水较好地满足树木生长, 因此限制作用较弱; 9 月份温度的升高能延长生长季, 增加树木光合作用的时间, 从而形成宽轮。北侧生长季及生长季后期高温与相对湿度结合影响光合作用而促进油松生长; 与 Cai 等^[32] 和彭剑峰等^[27] 在大别山的黄山松树轮研究的结果一致。油松生长受北侧生长季后期降水量的促进存在滞后效应。

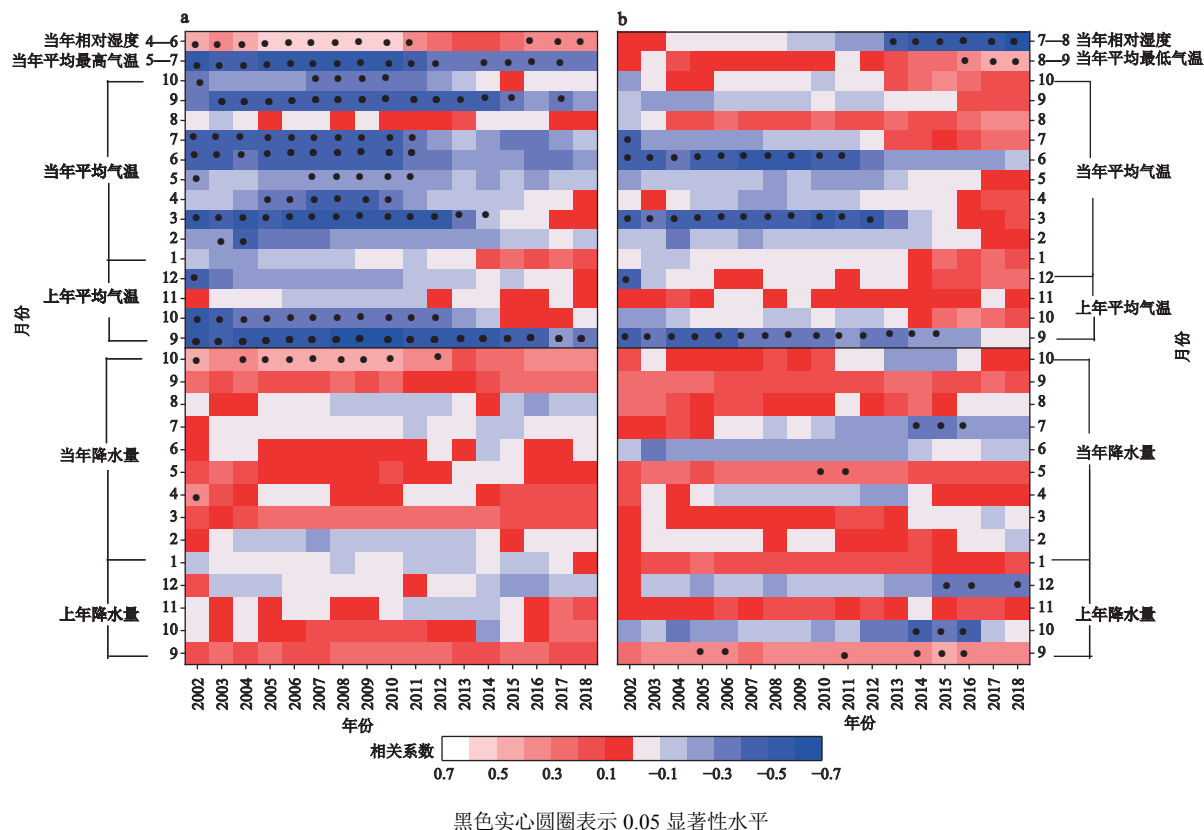


图 5 油松标准年表与麻城(a)、信阳(b)气象站气候要素的滑动相关分析

Fig.5 Moving correlations of *Pinus tabuliformis* tree ring-width standard chronology (STD) with the climatic elements of Macheng (a) and Xinyang (b) meteorological stations

鸡公山油松对大别山过渡带南北两侧气候的响应与 Liu 等^[20]对秦岭南北坡的油松研究结果不同, Liu 等的研究中南北坡油松分别对冬季温度呈现正响应和对初夏温度呈现负响应,这可能与采样点位置和海拔相关,南北坡油松因为山体的阻隔,秦岭北坡油松生长会受到冬季季风的影响,而南坡油松主要受夏季季风的影响;本研究中油松采样点位于鸡公山山顶,属于过渡带位置,是一个采样点与过渡带两侧气候数据的对比分析,与生长在南北坡的油松与同一气候区的气候因子相关有所不同。

3.2 油松对月均温度和降水响应的稳定性分析

滑动相关分析结果显示油松生长对南侧 6、7 月平均温度的响应似乎出现了失敏的现象^[38],这与前人的研究结果一致^[31-32,38]。可见油松生长的限制因子可能会发生变化,但仍然受着温度的间接影响。对北侧 8 月平均温度的响应出现的较为明显但不显著的“生长分离效应”^[39],可能是油松长期生长在较为温暖干燥的环境中,对温度升高的适应性较强,降水较为充足时一定阈值范围内的温度升高促

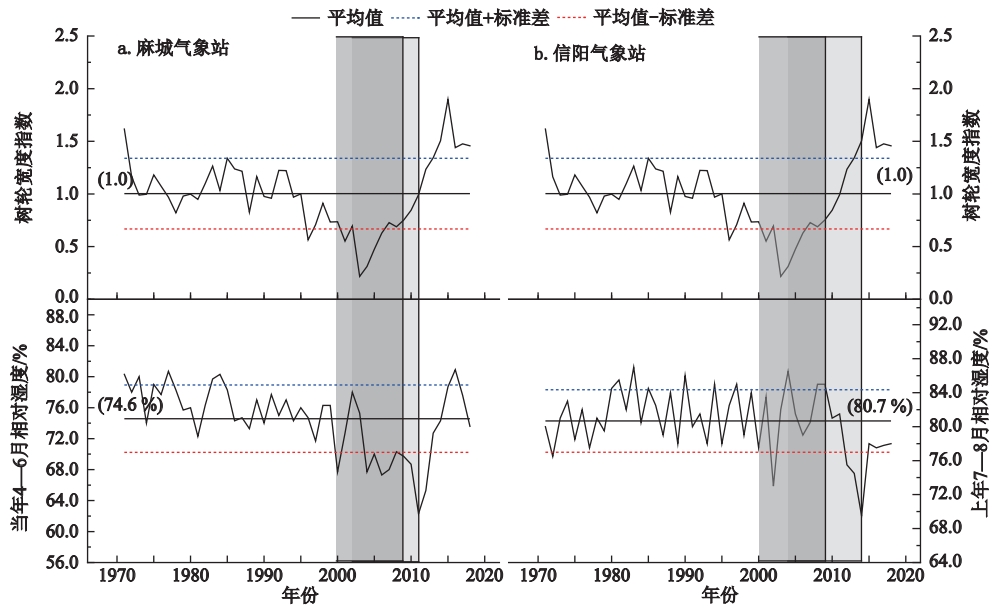
进油松生长。树木生长的分离效应在一些研究^[32,38-39]中均有发现。

相关分析和滑动相关分析结果显示,油松生长对气候响应的相关性和稳定性基本一致。整体上,过渡带南侧温度对油松生长负影响的稳定性较北侧显著;在油松生长旺盛期,当年 5—7 月平均最高气温的负限制稳定,6、7 月平均气温的负限制虽减弱,但仍然间接抑制着油松生长;因此,在麻城和信阳地区温度增加而降水变化不明显的情况下(图 2),受到南侧北亚热带春末夏初高温的抑制,过渡带生长的油松可能出现生长下降;而受到北侧当年 8 月平均气温和 8—9 月平均最低气温促进趋势的增强则表明油松在过渡带北侧具有较好的生长趋势,油松生长的南界可能会随北亚热带边界的北移而向北移动。

3.3 油松生长受干旱事件的影响

相关分析的结果表明相对湿度是树轮生长的主要限制因子,所以树轮宽度指数“V”型的 2000—2009 年持续低值明显受干旱的影响。

如图 6 所示,麻城气象站当年 4—6 月相对湿



深灰色和浅灰色分别代表轮宽低值期和相对湿度下降期

图6 油松树轮宽度指数与1971—2018年麻城气象站当年4—6月相对湿度和信阳气象站上年7—8月相对湿度变化的对比
Fig.6 Comparison of tree ring-width index of *Pinus tabulaeformis* and relative humidity from April to June of current year of Macheng meteorological station and relative humidity from July to August of previous year of Xinyang meteorological station from 1971 to 2018

度在2002之后的连续低湿度和信阳气象站上年7—8月相对湿度在2002年的极端低湿,都抑制着油松的生长,因此油松在2003年出现最低生长。这一研究结果与鸡公山附近的大别山4—7月干湿序列变化研究^[29]中的结果较为一致,都显示出2000年以来相对湿度明显的波动下降;油松轮宽曲线显示出的1996—2009年的持续低值表明研究区油松生长受到了区域干旱的影响。然而过渡带南北两侧相对湿度曲线与轮宽曲线趋势变化的时间不完全一致,可能与树木生长受到多种因素的共同限制,相对湿度间接影响树木生长有关。

4 结论

本文利用过渡带鸡公山油松样本建立了树木年轮宽度标准年表。研究发现树木生长对南北两侧气候因子的响应存在显著差异,并且气候响应差异随时间而变化。

鸡公山油松树轮宽度指数与南侧5—7月平均最高气温显著负相关、4—6月相对湿度显著正相关,表明亚热带的春末夏初温度对油松生长限制性较强、水汽则会促进油松生长;而与北侧暖温带相关发现高温也有一定的抑制作用,但8—9月平均最低气温对油松生长有显著促进作用。整体上可以看出,

鸡公山油松径向生长受过渡带南北两侧降水量促进作用不显著,受相对湿度限制较强,南侧4—6月相对湿度是和北侧上年7—8月相对湿度是油松生长的限制因子,油松生长受到温度、降水、大气的共同影响,南侧土壤水分有效性和北侧土壤水分的积累与油松生长密切相关。与过渡带南侧气候的相关性和稳定性都强于北侧,可能与研究区位于北亚热带地区边缘有关,但不论响应南侧还是北侧,油松生长都受到生长季后期干旱影响。

气候变暖情景下,鸡公山油松可能受到过渡带南侧高温带来的水分胁迫的加剧而出现生长衰退甚至死亡事件,而与北侧生长季、生长季后期气温正响应趋势的增强可能会使油松生长的南界向北移动。

参考文献(References):

- [1] 王宏, 杨东, 蓝小玉, 等. 基于SSPs路径下植被气候生产潜力的预测——以陕甘宁为例[J]. 高原气象, 2023, 42(1): 233-243. [Wang Hong, Yang Dong, Lan Xiaoyu et al. Prediction of climatic productivity of vegetation based on SSPs path—A case study of Shaanxi, Gansu and Ningxia. Plateau Meteorology, 2023, 42(1): 233-243.]
- [2] Morgan C, Losey A, Trout L. Late-holocene paleoclimate and treeline fluctuation in Wyoming's Wind River Range, USA[J].

- Holocene, 2014, 24(2): 209-219.
- [3] Shi Jiangfeng, Li Jinbao, Cook E R et al. Growth response of *Pinus tabulaeformis* to climate along an elevation gradient in the eastern Qinling Mountains, central China[J]. *Climate Research*, 2012, 53(2): 157-167.
 - [4] Zhang Yongxiang, Wilmking Martin, Gou Xiaohua. Changing relationships between tree growth and climate in Northwest China[J]. *Forest Ecology: Plant Ecology*, 2009, 201(1): 39-50.
 - [5] 冯娟, 华亚伟, 张志成, 等. 秦岭南坡镇安油松径向生长-气候因子关系对气温突变的响应 [J]. 植物科学学报, 2021, 39(3): 268-277. [Feng Juan, Hua Yawei, Zhang Zhicheng et al. Response of the relationship between *Pinus tabulaeformis* Carr. radial growth and climatic factors to abrupt changes in temperature in Qinling Zhen'an. *Plant Science Journal*, 2021, 39(3): 268-277.]
 - [6] 崔明星, 何兴元, 陈玮, 等. 河北木兰围场油松年轮生态学的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2339-2345. [Cui Mingxing, He Xingyuan, Chen Wei et al. Dendrochronology of Chinese pine in Mulan-Weichang, Hebei Province: A primary study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2339-2345.]
 - [7] Rollinson C R, Kaye M W, Canham C D. Interspecific variation in growth responses to climate and competition of five eastern tree species[J]. *Ecology*, 2016, 97(4): 1003-1011.
 - [8] Wang J. A preliminary study on spermatophyta flora of Dabie Mountain in Henan Province, China[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 1985, 19(3): 310-324.
 - [9] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 345-351. [Fan Weiyi, Wang Xiaolan. Advances in studies on the relationships between tree-ring width and climatic factors. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(2): 345-351.]
 - [10] He M, Yang B, Bräuning A et al. Recent advances in dendroclimatology in China[J]. *Earth-science Reviews*, 2019, 194: 521-535.
 - [11] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 天山山区树轮气候研究若干进展 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(4): 1-9. [Zhang Ruibo, Yuan Yujiang, Wei Wenshou et al. Research advances of dendroclimatology in Tianshan Mountains. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, 10(4): 1-9.]
 - [12] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1341-1352. [Liu Min, Mao Zijun, Li Yue et al. Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatic factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1341-1352.]
 - [13] 张朋磊, 刘滨辉. 气候变化对不同纬度兴安落叶松径向生长的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(3): 10-13+22. [Zhang Penglei, Liu Binhui. Effect of climate change on *Larix gmelinii* growth in different latitudes. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(3): 10-13+22.]
 - [14] Piao S, Ciais P, Huang Y et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
 - [15] 宋佃星, 延军平, 马莉. 近 50 年来秦岭南北气候分异研究 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 492-498. [Song Dianxing, Yan Junping, Ma Li. Study on climatic differentiation in the south and north Qinling Mountains in recent 50 years. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 492-498.]
 - [16] 李俊生. 秦岭林线树种太白红杉生态特征及其对气候变化的响应 [J]. 生物多样性, 2012, 20(1): 1. [Li Junsheng. Ecological characteristics of Sequoia Taibai and its response to climate change in the Qinling Mountains. *Biodiversity Science*, 2012, 20(1): 1.]
 - [17] 王红桃, 包光. 秦岭及周边地区树木径向生长与气候因子的关系研究进展 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(1): 52-58. [Wang Hongtao, Bao Guang. Advances in studies of relationships between tree radial growth and climatic factors in Qinling Mountains and the surrounding areas. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(1): 52-58.]
 - [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] 徐化成, 孙肇凤, 郭广荣, 等. 油松天然林的地理分布和种源区的划分 [J]. 林业科学, 1981(3): 258-270. [Xu Huacheng, Sun Zhao Feng, Guo Guangrong et al. Geographic distribution of *Pinus tabulaeformis* Carr. and classification of provenance regions. *Scientia Silvae Sinicae*, 1981(3): 258-270.]
 - [20] Liu Yu, Linderholm Hans W, Song Huiming et al. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and northern slopes of the central Qinling Mountains, central China[J]. *Boreas*, 2009, 38(2): 285-291.
 - [21] Wu Maili, Liu Na, Bao Guang et al. Climatic factors of radial growth of *Pinus tabulaeformis* in eastern Gansu, northwest China based on Vaganov-Shashkin model[J]. *Geografisk Annaler Series A-Physical Geography*, 2020, 102(3): 196-208.
 - [22] 田沁花, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 油松树轮记录在过去 134 年伏牛山 5—7 月平均最高温度 [J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 879-887. [Tian Qinhua, Liu Yu, Cai Qiufang et al. The maximum temperature of May-July inferred from tree-ring in Funiu Mountain since 1874 AD. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 879-887.]
 - [23] Peng Jianfeng, Li Jinbao, Li Xuan et al. Climate-growth relationships of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) at Mt. Shiren in climatic transition zone, central China[J]. *Biology-Basel*, 2022, 11(5).
 - [24] 李轩, 彭剑峰, 李静茹, 等. 伏牛山龙池堰南坡油松径向生长对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2022, 42(07): 2865-2877. [Li Xuan, Peng Jianfeng, Li Jingru et al. Climate-growth response of *Pinus tabulaeformis* in the south slope of Longchiman, Mt. Funiu, central China. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2865-

- 2877.]
- [25] 王婷, 李聪, 张弘, 等. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应 [J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5324-5332. [Wang Ting, Li Cong, Zhang Hong et al. Response of conifer trees radial growth to climate change in Baotianman National Nature Reserve, central China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5324-5332.]
- [26] 崔佳月, 彭剑峰, 李静茹, 等. 嵩山地区油松人工林树轮宽度对气候因子的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3497-3504. [Cui Jiayue, Peng Jianfeng, Li Jingru et al. Response of tree ring width of *Pinus tabulaeformis* plantation to climatic factors in Songshan Mountain, central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(10): 3497-3504.]
- [27] 彭剑峰, 李国栋, 李玲玲. 西大别山小林海黄山松树轮宽度的气候意义 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1857-1862. [Peng Jianfeng, Li Guodong, Li Lingling. Dendroclimatic potentials for the tree rings of Huangshan pine (*Pinus taiwanensis*) at Xiaolin-hai in the western Dabie Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1857-1862.]
- [28] 彭剑峰, 王婷. 黄柏山树轮生长对气候因子的响应及模拟 [J]. 地理科学, 2015, 35(5): 644-651. [Peng Jianfeng, Wang Ting. Response and model of tree-rings growth to climate factors at Huangbaishan Mountain in Henan Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(5): 644-651.]
- [29] 张涵玉, 蔡秋芳, 刘禹. 大别山 1846—2010 年干湿变化记录——来自树轮宽度的证据 [J]. 地球环境学报, 2020, 11(6): 648-659. [Zhang Hanyu, Cai Qiufang, Liu Yu. Tree-ring records revealed the dry/wet variation of the Dabie Mountains during 1846—2010. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(6): 648-659.]
- [30] 郑永宏, 张永, 邵雪梅, 等. 大别山地区黄山松和油松树轮宽度的气候意义 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 72-77. [Zheng Yonghong, Zhang Yong, Shao Xuemei et al. Climate significance of tree ring width of Huangshan Pine and Chinese Pine in the Dabie Mountains. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 72-77.]
- [31] Xu Yan, Li Wenjing, Shao Xuemei et al. Long-term trends in intrinsic water-use efficiency and growth of subtropical *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Pinus taiwanensis* Hayata in central China[J]. *Journal of Soil & Sediments*, 2014, 14(5): 917-927.
- [32] Cai Qiufang, Liu Yu, Qian Hengjun et al. Inverse effects of recent warming on trees growing at the low and high altitudes of the Dabie Mountains, subtropical China[J]. *Dendrochronologia*, 2019, 59: 125649.
- [33] 李文田. 鸡公山种子植物区系和植物资源 [J]. 资源开发与市场, 2007(7): 625-626+658. [Li Wentian. Flora of seed plant and plant resources of Jigong Mountain. *Resource Development & Market*, 2007(7): 625-626+658.]
- [34] 吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990. [Wu Xiangding. Tree ring and climate change. Beijing: Meteorological Press, 1990.]
- [35] Holmes R K. Dendrochronology program library. Users manual[M]. Tucson, AZ, USA: University of Arizona, 1994.
- [36] Cook E R. A time series approach to tree-ring standardization[D]. Tucson, AZ, USA: University of Arizona, 1985.
- [37] 蔡秋芳, 刘禹. 湖北麻城马尾松树轮宽度对气候的响应及 1879 年以来 6—9 月平均最高气温重建 [J]. 科学通报, 2013, 58(S1): 169-177. [Cai Qiufang, Liu Yu. The June-September maximum mean temperature reconstruction from Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) tree rings in Macheng, southeast China since 1879 AD. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(S1): 169-177.]
- [38] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D et al. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 678-682.
- [39] Jacoby G C, D'Arrigo R D. Tree ring width and density evidence of climatic and potential forest change in Alaska[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(2): 227-234.

Response of *Pinus tabuliformis* radial growth to climate factors in the north-south transition zone of China: Case study in the Jigong Mountain

Wei Xiaoxu¹, Peng Jianfeng^{1,2,3}, Peng Meng¹, Li Xuan¹, Cui Jiayue¹, Li Jinkuan¹, Wei Yafei^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Key Laboratory of Earth System Observation and Simulation of Henan Province, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. National Demonstration Center for Environmental and Planning, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: In order to study the response of tree growth to north-south climate change in the subtropical and warm temperate climate transition zone, taking *Pinus tabuliformis* forest of the Jigong Mountain Nature Reserve in Xinyang City, Henan Province as the research object, the radial growth width chronology of it is established using the tree ring method. The characteristic values of chronology show that the standard chronology of high quality containing many climate information can reflect the impact of climate change on tree growth. The analyses of the standard chronology and meteorological factors of the north and south weather station of the Jigong Mountain find that: The growth of *Pinus tabuliformis* is not only negatively correlated with the temperature, but also positively correlated with the relative humidity in almost all months, significantly with May-July temperature (mean temperature in June, mean maximum temperature in May and June, and mean minimum temperature in June and July) of the Macheng meteorological station on the south side of the Jigong Mountain, which shows that the soil water stress mainly limits the growth, caused by high temperature in the south side of the transition zone; and the April-June (late spring and early summer) relative humidity is the limiting factor for the growth of *Pinus tabulaeformis* on the south side of the Jigong Mountain. However, the August-September temperature (the mean temperature in August and the mean minimum temperature in August and September) has an obvious effect on promoting the growth of *Pinus tabulaeformis*, and July-August relative humidity of last year is the limiting factor of *Pinus tabulaeformis*' growth on the north side of the Jigong Mountain. The precipitation in September (the late growing season) had a lag effect on the growth of *Pinus tabulaeformis*. In the moving correlation analysis, there is a enhanced trend positively responding the August-September mean temperature of Xinyang meteorological station on the north side of the transition zone in recent years. Therefore, under the climate warming, the southern boundary of *Pinus tabulaeformis* may move toward the north due to high temperature inhibition (negative correlation with the temperature of subtropical Macheng). The aim of the study is to provide a basic data support for forest management and renewal in transition zones through studying the growth dynamics of *Pinus tabuliformis* in response to climate warming.

Key words: the Jigong Mountain; *Pinus tabuliformis*; tree-ring width; climate response; the north-south transition zone